Environment Canada
Forestry Service

Environnement Canada
Service des Forêts

Diagnosis of air pollutant and natural stress symptoms on forest vegetation in western Canada

S.S. Malhotra and R.A. Blauel

Northern Forest Research Centre • Edmonton, Alberta • Information Report NOR-X-228

87-01579/

ISSN 0704-7673

DIAGNOSIS OF AIR POLLUTANT AND NATURAL STRESS SYMPTOMS ON FOREST VEGETATION IN WESTERN CANADA

S.S. MALHOTRA and R.A. BLAUEL

INFORMATION REPORT NOR-X-228
NOVEMBER 1980

NORTHERN FOREST RESEARCH CENTRE
CANADIAN FORESTRY SERVICE
ENVIRONMENT CANADA
5320 - 122 STREET
EDMONTON, ALBERTA, CANADA
T6H 3S5

Malhotra, S.S. and R.A. Blauel. 1980. Diagnosis of air pollutant and natural stress symptoms on forest vegetation in western Canada. Environ. Can., Can. For. Serv., North. For. Res. Cent. Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR-X-228.

ABSTRACT

Industrial operations in Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and the Northwest Territories release airborne emissions that can injure surrounding forest vegetation. This report describes symptoms of these pollutants and of natural stresses that may appear similar. The industries discussed include natural gas processing plants, oil wells and refineries, oil sands plants, metal mines and smelters, cement plants, potash industry, pulp and paper mills, and agricultural chemical production and application. Nineteen pages of color photographs provide examples of these symptoms on forest vegetation.

RESUME

Les opérations industrielles dans l'Alberta, la Saskatchewan, le Manitoba et les Territoires du Nord-Ouest émettent des effluents aéroportés susceptibles d'endommager la végétation environnante. Le présent rapport décrit les symptômes de ces polluants ainsi que les stress naturels qui peuvent y ressembler. Les industries considérées comprennent les usines de traitement du gaz naturel, les puits et raffineries d'huiles, les usines de transformation des sables bitumineux, les mines et fonderies de métaux, les usines de ciment, l'industrie de la potasse, les usines de pâtes et papiers ainsi que la production et l'application de produits chimiques à des fins agricoles. Dix-neuf pages de photographies en couleurs donnent des exemples de ces symptômes sur la végétation forestière.

PREFACE

A wide variety of industrial operations in Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and the Northwest Territories release considerable quantities of airborne emissions that can have a deleterious effect on surrounding forest vegetation. Such industries include natural gas processing plants, oil wells and refineries, oil sands plants, metal mines and smelters, cement plants, potash industry, pulp and paper mills, and agricultural chemical production and application. Some of the major pollutants from these operations are sulfur dioxide; oxides of nitrogen; hydrocarbons; heavy metals and particulates; dusts containing calcium, potassium, and sodium oxides; and salt water.

Visual symptoms of emission toxicity on vegetation are often the only basis for identifying an air pollution problem and assessing its magnitude. Under field conditions, symptom development on vegetation generally results from exposure to total emissions from an industry rather than to an individual pollutant. An attempt is made in this handbook to utilize the visual symptoms of air pollution toxicity to diagnose and assess the impact on forest vegetation of the total airborne emissions from a given industry.

The symptoms of air pollutant toxicity are not highly specific and can be confused with those caused by nonpollutant stresses such as abnormal climatic conditions, nutrient deficiencies, and insect and disease disorders. The main purpose of this handbook is to assist field personnel who lack formal training and experience in air pollution biology to become familiar with visible symptoms of airborne pollutants on forest vegetation and to acquaint them with certain similarities in symptom development by pollutant and nonpollutant stresses.

S.S. Malhotra
R.A. Blauel

PREFACE

Une grande variété d'opérations industrielles dans l'Alberta, la Saskatchewan, le Manitoba et les Territoires du Nord-Ouest, rejettent des quantités considérables d'effluents aéroportés qui peuvent avoir un effet délétère sur la végétation forestière environnante. Ces industries comprennent les usines de traitement du gaz naturel, les puits et raffineries d'huiles, les usines de transformation des sables bitumineux, les mines et fonderies de métaux, les usines de ciment, l'industrie de la potasse, les usines de pâtes et papiers ainsi que la production et l'application de produits chimiques à des fins agricoles. Au nombre des principaux polluants résultant de ces opérations se trouvent l'anhydride sulfureux; les oxydes d'azote; les hydrocarbures, les métaux et particules lourds; les poussières contenant des oxydes de calcium, de potassium et de sodium ainsi que l'eau salée.

Les symptômes visuels de la toxicité des effluents sur la végétation constituent souvent la seule base d'identification d'un problème de pollution atmosphérique et d'évaluation de son ampleur. Dans la nature, l'apparition de symptômes sur la végétation procède généralement de l'exposition aux effluents intégraux d'une industrie plutôt que d'un polluant déterminé. Dans le présent manuel une tentative est faite en vue d'utiliser les symptômes visuels de la toxicité de la pollution atmosphérique pour diagnostiquer et évaluer l'impact sur la végétation forestière des effluents intégraux aéroportés d'une industrie donnée.

Les symptômes de la toxicité des polluants atmosphériques ne sont pas très spécifiques, d'où la possibilité de les confondre avec ceux provoqués par des stress non polluants tels que conditions climatiques anormales, carences d'éléments nutritifs et troubles causés par les insectes et les maladies. Le but principal de ce manuel est d'aider le personnel oeuvrant sur le terrain, dépourvu

de formation classique et d'expérience relativement à la biologie de la pollution atmosphérique, à se familiariser avec les symptômes visuels des polluants aéroportés sur la végétation forestière et à se renseigner sur certaines similitudes des symptômes provoqués par les polluants et par les stress non polluants.

S.S. Malhotra
R.A. Blauel

CONTENTS

	Page
INTRODUCTION	1
HOW TO USE THIS HANDBOOK	1
HOW TO DIAGNOSE AIR POLLUTION INJURY	3
Helpful Hints	3
HEALTHY VEGETATION	5
CONIFEROUS SPECIES	5
DECIDUOUS SPECIES	5
UNDERSTORY SPECIES	7
GROUND COVER AND TREE LICHENS	7
FOREST VEGETATION AND NATURAL STRESSES	9
CLIMATE	9
Drought	9
Excessive Moisture	11
Hail	11
Temperature and Light	11
NUTRIENT DEFICIENCY	13
DISEASES	15
INSECTS	16
Coniferous Species	16
Deciduous Species	16
FOREST VEGETATION AND POLLUTANT STRESSES	18
BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF VEGETATION	18
NATURE, CONCENTRATION, AND EXPOSURE TIME OF POLLUTANTS	18
ENVIRONMENTAL CONDITIONS	18
NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY	19
SULFUR DIOXIDE	19
Phytotoxicity	19
Symptoms on Coniferous Species	20
Symptoms on Deciduous Species	21
HYDROCARBONS	23
Liquid Hydrocarbons	25
Symptoms on Coniferous Species	25
Other Species in Coniferous Stands	27
Symptoms on Deciduous Species	27
Other Species in Deciduous Stands	29
Gaseous Hydrocarbons	29
Coal Emissions	30
SALTWATER SPILLS	30
Phytotoxicity	30
Symptoms on Coniferous Species	30
Symptoms on Deciduous Species	31
Other Species	31
OTHER EMISSIONS	33
Elemental Sulfur	33
Flare Pits and Well Blowouts	33
Acid Mists	35

Page

METAL MINING AND SMELTING INDUSTRY 36
PHYTOTOXICITY 36
SYMPTOMS ON VEGETATION WITHIN A SPRUCE COMMUNITY 36
SYMPTOMS ON VEGETATION WITHIN A PINE COMMUNITY 37
Fluoride Emissions 39
SYMPTOMS ON VEGETATION WITHIN A DECIDUOUS COMMUNITY 39
Fluoride Emissions 41
BRYOPHYTES AND LICHENS 41

OTHER MINERAL INDUSTRIES 45
CEMENT INDUSTRY 45
POTASH INDUSTRY 46
STORAGE PILES OF CALCAREOUS MATERIALS 46

PULP AND PAPER INDUSTRY 47
SYMPTOMS ON LICHENS 47
SYMPTOMS ON CONIFEROUS SPECIES 47

STATIONARY COMBUSTION ENGINES 51
NITROGEN OXIDES 51
OZONE AND PAN 52

AGRICULTURAL CHEMICAL INDUSTRY 53
AMMONIA VAPOR 53
HERBICIDES, SOIL STERILANTS, AND PESTICIDES 53
Herbicides 53
Soil Sterilants 55
Pesticides 57

SUMMARY OF MAJOR INDUSTRIAL EMISSIONS AND VISIBLE INJURY SYMPTOMS ON FOREST VEGETATION 59

ACKNOWLEDGMENTS 66

GLOSSARY 67

APPENDIXES 71
1. COMMON AND SCIENTIFIC NAMES OF PLANTS 72
2. COMMON AND SCIENTIFIC NAMES OF DISEASES 74
3. COMMON AND SCIENTIFIC NAMES OF INSECTS 75
4. ABBREVIATIONS AND CHEMICAL NOMENCLATURE 76

POLLUTANT AND VEGETATION INDEX 77

FIGURES

		Page
1.	Map of the major air pollution sources in Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and the Northwest Territories	2
2-17.	Healthy vegetation	6
18-33.	Natural stresses—climate. Drought, winter drying, flooding, natural senescence, frost, and temperature symptoms on forest vegetation	8
34-47.	Natural stresses—nutrient deficiency. Nitrogen, potassium, phosphorus, iron, and sulfur deficiency symptoms on forest vegetation	10
48-62.	Natural stresses—diseases. Disease symptoms on forest vegetation	12
63-78.	Natural stresses—insects. Insect symptoms on forest vegetation	14
79-94.	Pollutant stresses—natural gas and oil industry. Sulfur dioxide emission symptoms on coniferous vegetation	22
95-110.	Pollutant stresses—natural gas and oil industry. Sulfur dioxide emission symptoms on deciduous vegetation	24
111-126.	Pollutant stresses—natural gas and oil industry. Light- and heavy-weight hydrocarbon emission symptoms on coniferous vegetation	26
127-142.	Pollutant stresses—natural gas and oil industry. Light- and heavy-weight hydrocarbon emission symptoms on deciduous vegetation	28
143-158.	Pollutant stresses—natural gas and oil industry. Saltwater spill symptoms on forest vegetation	32
159-172.	Pollutant stresses—natural gas and oil industry. Other emission (elemental sulfur, flare pit, well blowout, and acid mist) symptoms on forest vegetation	34
173-188.	Pollutant stresses—metal mining and smelting industry. Nickel-copper-zinc smelter emission symptoms on vegetation within a spruce community	38
189-204.	Pollutant stresses—metal mining and smelting industry. Nickel-copper-zinc smelter emission symptoms and fluoride emission (aluminum smelter) symptoms on vegetation within a pine community	40
205-220.	Pollutant stresses—metal mining and smelting industry. Nickel-copper-zinc smelter emission symptoms on vegetation within a deciduous community	42
221-234.	Pollutant stresses—other mineral industries. Cement dust, salts, and calcareous material emission symptoms on forest species	44
235-250.	Pollutant stresses—pulp and paper industry. Emission symptoms on forest vegetation	48

Page

251-266. Pollutant stresses—stationary combustion engines and agricultural chemical industry (anhydrous ammonia fertilizer). Symptoms of nitrogen oxides and ammonia vapor emissions on forest species 50

267-278. Pollutant stresses—agricultural chemical industry (herbicides). 2,4,5-T and 2,4-D symptoms on forest species 54

279-290. Pollutant stresses—agricultural chemical industry (soil sterilants and pesticides). Picloram, bromacil, sodium chlorate, and amitrole soil sterilants and dimethoate pesticide symptoms on forest species 56

TABLES

1. Ranking of boreal forest tree species by sensitivity to SO_2 20

2. Species sensitivity to salt emissions from the potash industry 46

INTRODUCTION

Scattered throughout Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and the Northwest Territories are industrial operations extracting and processing the varied natural resources of this vast area. These operations include natural gas processing plants, oil wells and refineries, oil sands plants, metal mines and smelters, cement plants, potash industry, pulp and paper mills, and agricultural chemical production and application (Fig. 1). All of these industries release airborne pollutants such as sulfur dioxide (SO_2), oxides of nitrogen (NO_X), ozone (O_3), hydrocarbons, and heavy metals—emissions that can damage surrounding forest vegetation.

The visible symptoms that such air pollutants cause on vegetation are often not highly specific; that is, they can be very similar to the symptoms caused by natural stresses in the forest. Consequently, when vegetation in an area declines, it is difficult to determine whether it is air pollutant toxicity that is affecting the vegetation.

Because many field personnel do not have formal training and experience in air pollution biology, this handbook has been written to assist in identifying the visible symptoms of airborne pollutants on forest vegetation and in separating them from often very similar symptoms caused by natural factors such as nutrient deficiency, climate, diseases, and insects. It is hoped that the information provided here will be sufficient to enable a keen observer to sort out the possible cause(s) of environmental degradation. If there is doubt, assistance should be obtained from scientific experts at universities, government agencies, or private consulting companies.

HOW TO USE THIS HANDBOOK

Because this handbook is intended for use in the field, it differs from other guides to air pollution symptomology in that it describes the effects of the **total aerial emissions** from each type of industry in the region. Vegetation in the field develops symptoms in response to the total emissions from any industrial operation, not to individual pollutants in isolation. Pollutant symptoms on spruce around a metal smelter, for example, differ from symptoms on the same species around a natural gas processing plant, even though SO_2 is the main pollutant in each case. Smelters also emit heavy metal particulates, and the combination of SO_2 and heavy metals causes different effects on vegetation than SO_2 alone does. Almost all of the photographs illustrating air pollutant symptoms were taken of actual vegetation in the field. Only the nutrient deficiency, nitrogen oxide, and ammonia vapor symptoms were developed under controlled conditions in the laboratory.

The description of pollutant symptoms is organized according to industry. The major industries dealt with and their emissions are

natural gas and oil processing—SO_2, hydrocarbons, salt water, nitrogen dioxide, hydrogen sulfide, and small amounts of heavy metals and other particulates,

metal mining and smelting—SO_2, heavy metals (copper, zinc, nickel, cadmium, lead) and other particulates,

cement production—dust containing calcium, potassium, and sodium oxides,

potash mining and refining—potassium and sodium chlorides,

pulp and paper manufacturing—sulfur gases, methyl mercaptan, dimethyl sulfide, sodium hydroxide, and ammonia,

stationary combustion engines—oxides of nitrogen, ozone, PAN, hydrocarbons, sulfur gases, and carbon monoxide, and

agricultural chemical production and application (fertilizers, herbicides, soil sterilants, and pesticides)—ammonia vapor, 2,4-D, 2,4,5-T, picloram, bromacil, sodium chlorate, amitrole, and dimethoate.

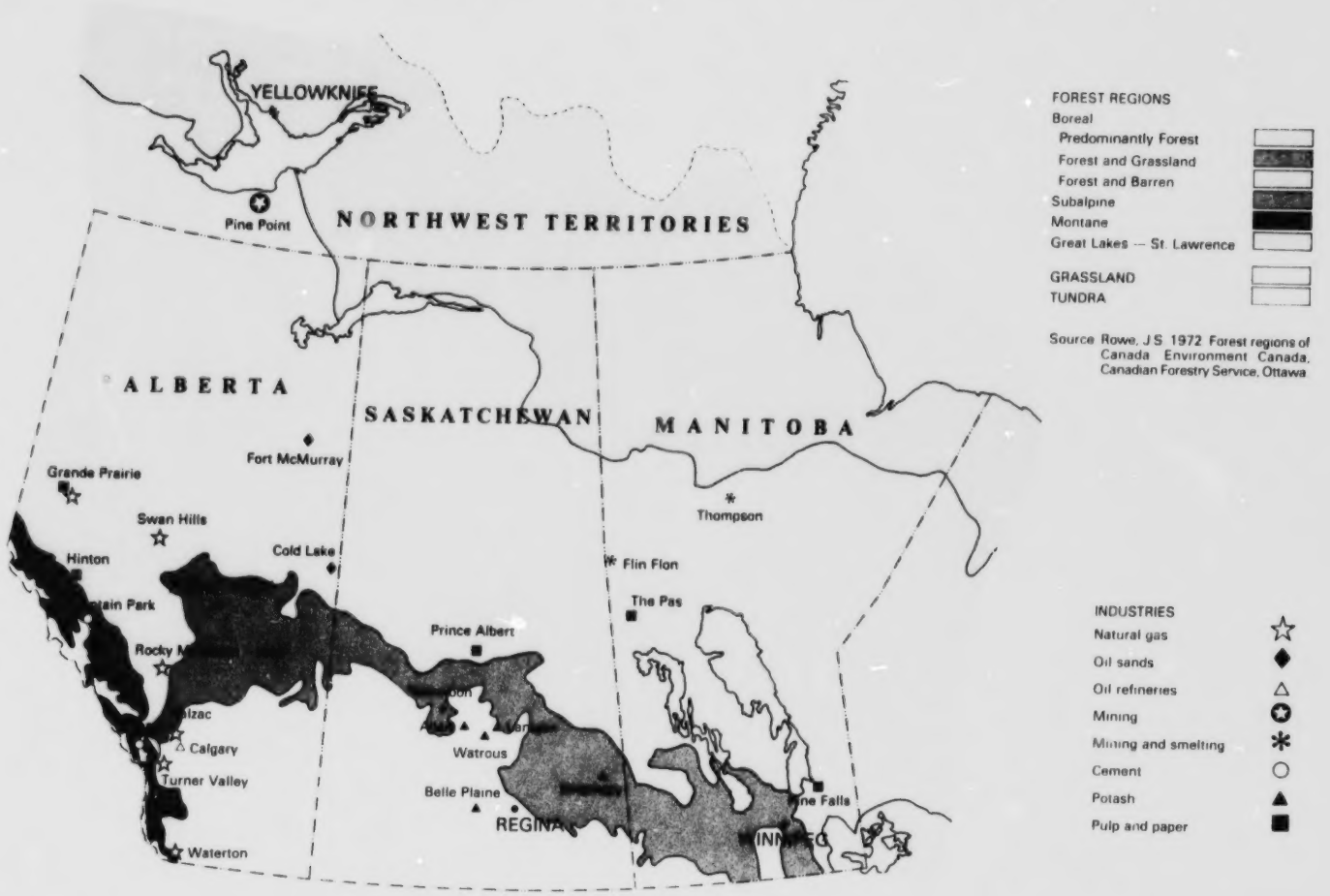


Figure 1. Map of the major air pollution sources in Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and the Northwest Territories.

If air pollutants are suspected as the cause of vegetation injury, the investigator should determine if there is a source of emissions in the affected area and refer to the section on that industry in this handbook. Symptoms are described on both coniferous and deciduous species and, where applicable, on lichens and ground-cover species. For quick reference, a summary of symptoms appears in table form on pages 59-65. Also included are a glossary of technical terms, lists of common and scientific names of plants, diseases, and insects, a list of abbreviations and chemical nomenclature, and a pollutant and vegetation index.

HOW TO DIAGNOSE AIR POLLUTION INJURY

Air pollutant symptoms can be difficult to distinguish from symptoms caused by natural stresses. A good knowledge of the affected area is required, and considerable caution should be exercised in attributing nonspecific visible injuries and other abnormalities to air pollutants.

1. The first step is to establish the base-line condition of unaffected vegetation near the general area of concern. Affected vegetation can be compared with this.

2. If air pollutants are suspected as the cause of vegetation injury, verify the existence of an air pollution source in the problem area. Obtain information on the types of pollutants, the quantities released into the atmosphere, and the sources. Also determine the height of the stack and whether there has been a malfunction of the pollutant extracting devices.

3. If possible, obtain air quality, meteorological, and topographical information to determine the distribution pattern of air pollutants in the area.

4. Examine the visible injury symptoms on different species of vegetation and compare them with characteristic symptoms produced by individual pollutants or by total emissions from a similar industry, as documented and illustrated in this handbook. It is preferable to use the same indicator plant species throughout the affected areas.

5. Because symptoms of pollution can often be confused with those caused by natural stresses, it is important to consider factors such as soil nutrient deficiency, adverse climatic conditions, and disease and insect disorders. Insect infestations can ususally be identified by the presence of the insect in one of its life forms, and diseases can be confirmed by microscopic examination.

6. In many cases, air pollution injury to vegetation can be verified by chemical analysis of the affected vegetation for the presence of pollutants such as sulfur, fluoride, and heavy metals. There is generally a good relationship between the pollutant content and physical injury symptoms on vegetation. Changes in soil chemistry and pollutant content of the soil can also provide a good indication of pollutant impact on vegetation.

HELPFUL HINTS

1. Lichens are much more sensitive to air pollution than are vascular plants. Their extreme sensitivity to SO_2 and trace elements makes them a valuable biological tool for early warning and monitoring of air pollution injury to vegetation. The feather moss communities, lichen species inhabiting the branches and trunks of trees, and lichens growing on rock surfaces are all important bioindicators. When exposed to emissions from such industries as pulp mills, metal smelters, and oil and natural gas processing plants, most tree lichens start to show symptoms of degradation similar to those caused by natural deterioration. In areas affected by air pollutants, lichens become depleted, leaving only remnants, and the species distribution changes. Analysis of the remaining lichens to determine the presence of pollutant (emission) elements is often useful in diagnosing the cause of injury.

Where the lichens are still intact, they can serve as indicators of smelter pollution and help in delineating the impinge-

ment zones. Furthermore, branch lichens from a homogeneous population in an unaffected area can be transplanted at increasing distances from the air pollution source and can be monitored for vigor, density, diversity, and emission element content over time. The relationship between changes in such parameters and distance from the source provides another effective means for assessing air pollution injury to vegetation and determining the impingement zones. Photographs taken when sample plots are first established and at different time intervals can be used for comparing the health of lichens in a gradient from the pollution source.

2. In general, symptom development is more prominent on the side of branches facing the emission source.

3. Deciduous species generally develop air pollutant symptoms much more rapidly than conifers. Conifers, because of their long foliar retention time, can accumulate pollutants to toxic levels and therefore are often more susceptible to lethal injury than deciduous species, which lose their leaves annually.

4. The response of vegetation to pollutants is mediated by many factors such as stage of plant development, time of year (dormancy vs. active growth), possible synergistic, additive, or antagonistic effects, atmospheric conditions (temperature, humidity, and wind speed and direction), soil moisture and nutrient status, time of day (gas exchange capability or open vs. closed stomata), type of vegetation (sensitive vs. resistant), pollutant concentration, and length of exposure time.

HEALTHY VEGETATION

In order to detect symptoms produced by any stress, whether natural or air pollutant, it is necessary first of all to know what healthy forest vegetation looks like. Not all healthy vegetation will look exactly like the common tree, shrub, and lichen species shown here, because foliar age, climate, and edaphic factors influence the color and form of leaves. Immature foliage, for example, is generally smaller, and its normal color and form are often different from those of mature foliage. Under normal conditions, leaf color of any species at a given site should be fairly uniform. The investigator should establish a base line for normal vegetation at each site.

CONIFEROUS SPECIES

Jack pine, lodgepole pine, white spruce, black spruce, balsam fir, and tamarack are the most common coniferous species in the boreal forest. **Jack pine** and **lodgepole pine** hybridize in a zone within the boreal forest in central and northwestern Alberta. Because pollutant and natural stress symptoms on jack pine, lodgepole pine, and their hybrids are usually very similar, these species have been treated as one. Mature needles of healthy pine foliage occur in pairs, are 2.5-7.5 cm long, uniformly dark green in color, straight or curved, and sometimes slightly twisted (Figs. 2 and 3). Healthy needles are normally retained on the tree for 3-5 years.

White spruce, black spruce, and **balsam fir** all have similar foliage. The branches bear needles singly along much of their entire length, and needles are normally retained from 5 to 8 years (Fig. 4). Mature needles are uniformly dark green and are normally straight to slightly curved with a prominent midvein (Fig. 5). Spruce needles are 1.2-2.5 cm long, four-sided in cross section, and easily rolled between the fingers, while balsam fir needles are 2.0-3.0 cm long, flat, and not easily rolled. The best diagnostic feature for differentiating black spruce from white spruce is the cone. Black spruce cones are egg-shaped (2.5 cm long) and are retained on the tree, while white spruce cones are cylindrical (2.5-7.5 cm long) and remain on the tree from only midsummer to midwinter. Except in the far north, black spruce is commonly found in wetlands and white spruce is found on the uplands.

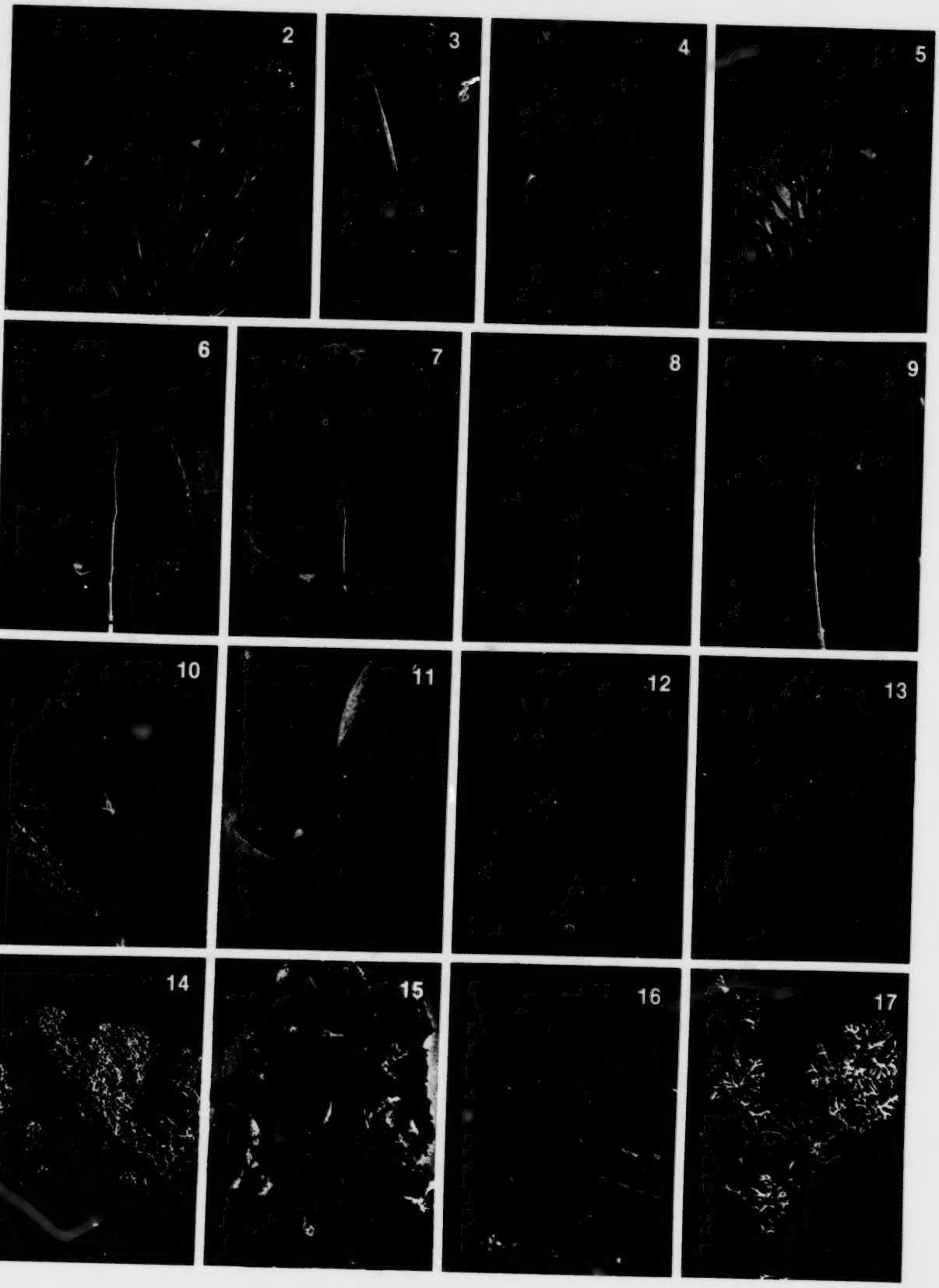
Tamarack, or **eastern larch,** is also a common conifer in the lowlands. Its needles, which occur in clusters of 10-20, are quite small (about 2.5 cm long), slender, soft, and pale green; they turn yellow in autumn and drop off.

DECIDUOUS SPECIES

The most common deciduous species are balsam poplar, trembling aspen, and white birch. **Balsam poplar** leaves are oval, approximately 7.5-12.5 cm long, fine-toothed, and shiny green on the upper surface; on the lower surface they are whitish green and mainly hairless. They have a slightly less rounded base than trembling aspen leaves and gradually taper to a sharp tip (Fig. 6).

Mature foliage of **trembling aspen** is bright green on the upper surface, pale green on the lower, and always hairless. Leaf blades are circular in shape, approximately 4.0-5.0 cm in diameter, and fine-toothed with a short, pointed tip. The leaf stalk (petiole) is flat in cross section (Fig. 7).

White birch leaves are 7.5 cm long, more or less oval, sometimes triangular in shape, and often sharply double-toothed (Fig. 8). Mature leaves have uniformly bright green upper surfaces and slightly pale and hairy undersides. Mature bark is characteristically white with prominent lenticels (horizontal markings).


2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17

UNDERSTORY SPECIES

Common woody and herbaceous understory species are numerous and diverse. **Willow** leaves are 7.5-10.0 cm long, relatively narrow (2.5 cm), usually fine-toothed, and tapered at both ends. Leaves have dark green upper and pale green lower surfaces (Fig. 9). **Green alder** leaves, which closely resemble white birch leaves, are somewhat sharp-toothed and broadly oval. They have dull green upper surfaces (Fig. 10) and hoary undersurfaces. **Chokecherry** has oval leaves (7.5-10.0 cm long) that are broadest in the middle. They are abruptly tapered at both ends, dull green on top, and finely toothed, each tooth ending in a straight, hairless point.

The normal, healthy conditions of **Labrador tea, prickly rose,** and **wild sarsaparilla** are shown in Figs. 11, 12, and 13, respectively.

GROUND COVER AND TREE LICHENS

Lichens and bryophyte species make up most of the ground cover. The predominant ground **lichens** are the reindeer (*Cladonia-Cladina* species) lichens. *Cladina alpestris*, a ubiquitous lichen in the boreal forest, is shown in Fig. 14, and a large thallus of *Peltigera aphthosa* is shown in Fig. 15. Lichen species are also commonly found inhabiting the branches and trunks of trees (corticolous lichens) (Fig. 17) and rock surfaces (saxicolous lichens). **Bryophytes,** which include feather mosses (Fig. 16), other mosses, and liverworts, are very conspicuous and normally constitute a considerable portion of the vegetative mat.

Suggested Reading

Hosie, R.C. 1969. Native trees of Canada. 7th edition. Canada Department of Fisheries and Forestry, Canadian Forestry Service. Ottawa, Ontario.

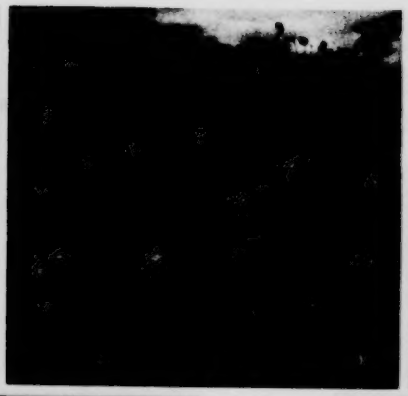
Moss, E.H. 1959. Flora of Alberta. University of Toronto Press. Toronto, Ontario.

HEALTHY VEGETATION (Figs. 2-17).

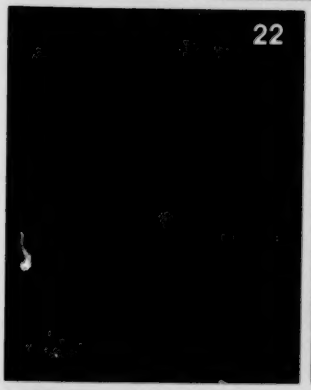
Fig. 2. Pine branch. **Fig. 3.** Close-up of pine needles. **Fig. 4.** White spruce branch. **Fig. 5.** Close-up of white spruce needles. **Fig. 6.** Upper leaf surface of balsam poplar. **Fig. 7.** Upper leaf surface of trembling aspen. **Fig. 8.** Upper leaf surface of white birch. **Fig. 9.** Upper leaf surface of willow. **Fig. 10.** Upper leaf surface of green alder. **Fig. 11.** Current and 1-year-old foliage of Labrador tea. **Fig. 12.** Prickly rose. **Fig. 13.** Wild sarsaparilla. **Fig. 14.** Ground-cover lichen—*Cladina alpestris.* **Fig. 15.** Ground-cover lichen—*Peltigera aphthosa.* **Fig. 16.** Ground-cover feather moss—mostly *Pleurozium schreberi.* **Fig. 17.** Tree lichens—*Bryoria* sp., *Hypogymnia physodes, Parmelia sulcata,* and *Usnea* sp.

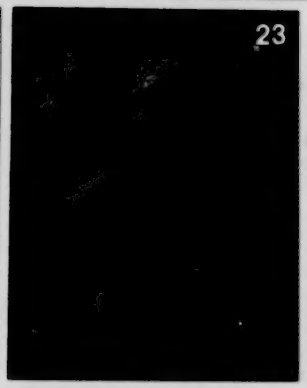
18

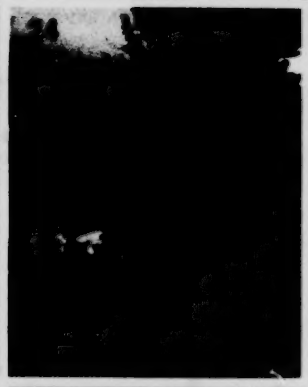
19

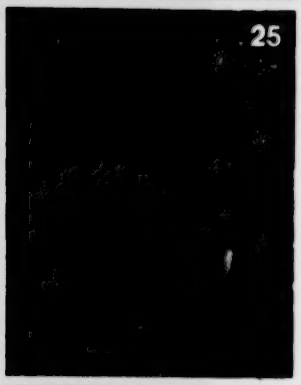


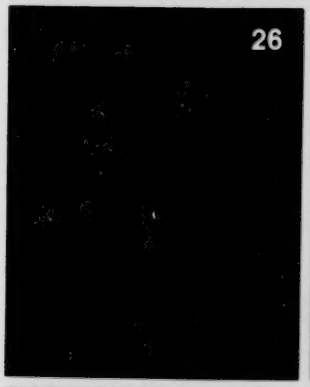
21

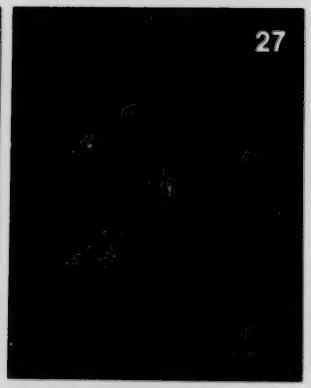

22

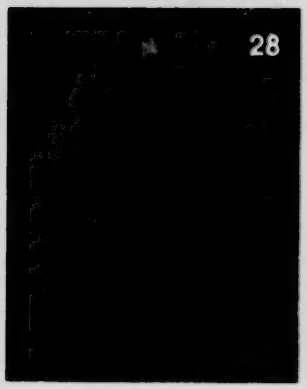

23

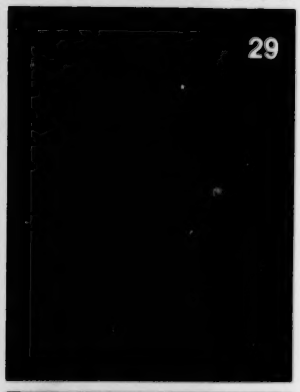


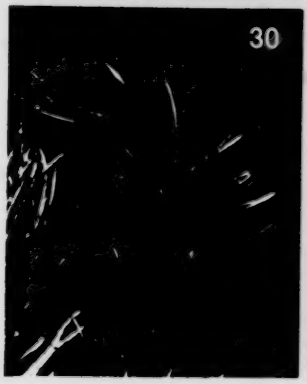

25

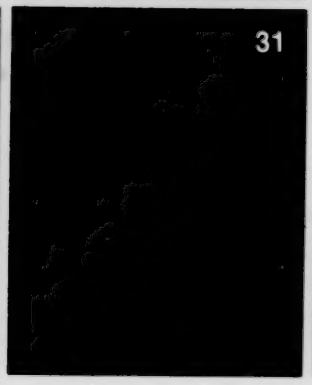

26


27

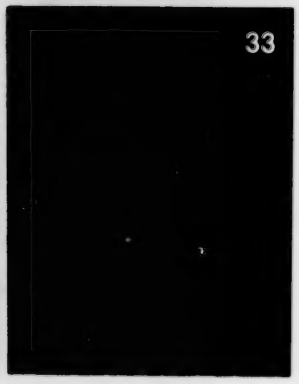

28


29


30


31

32


33

FOREST VEGETATION AND NATURAL STRESSES

Trees and herbaceous species are subject to many infectious and noninfectious stresses that are an integral part of the natural ecosystem. Many of these stresses cause symptoms that are similar to those produced by air pollutants. In diagnosing pollutant impact on a forest it is therefore imperative to recognize and identify the influence of natural stresses. Presented here are a few of the most common natural stresses that may cause visible symptoms similar to those produced by airborne pollutants. Just as the symptoms caused by pollutants can be similar to those caused by natural stresses, so can the symptoms produced by different natural stresses be similar. An attempt is made here, however, to provide enough information for the user to make a credible judgment on the cause of injury to forest vegetation, whether pollutants or natural stresses.

CLIMATE

Water availability, hail, temperature, and light are frequent causes of vegetation injury or mortality in the forest. Meteorological records or reports of special weather phenomena may help to accurately assess a climate-related incident. Because topography can modify the effects of climatic patterns, it must be taken into account in such assessments.

DROUGHT

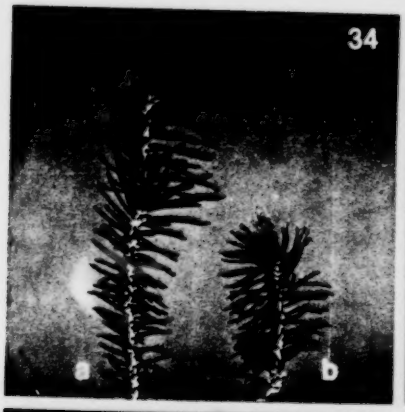
Periods of little or no precipitation can result in severe drought conditions. Young plants display drought symptoms first because their root systems are not developed enough to supply water from deeper reserves or because their transpiration greatly exceeds their water absorption capacity. In coniferous seedlings the first symptom is wilting of foliage and new shoots. Severe wilting can be followed by general yellowing (chlorosis), then browning and necrosis (tissue death), and eventually death of the seedling (Fig. 18). Deciduous species respond similarly to water deficit (Fig. 19).

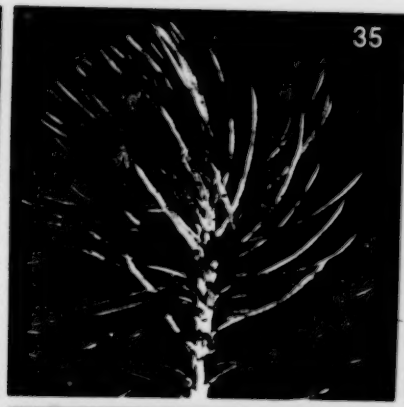
Drought injury can result in winter from excessive transpiration during brief periods of high temperatures when there is an inadequate supply of water from the frozen stem and root system. This can severely injure buds and generally results in lack of foliage the next growing season (Fig. 20). **Red belt** areas of native conifers (Fig. 21) are examples of winter drying by chinook winds in mountainous areas, especially on the eastern slopes of the Rocky Mountains. Red belt is caused by rapid extreme changes in temperature from below 0°C to 20°C. Most conifers are susceptible to red belt injury, which is signified by reddish brown foliage that tends to remain on the tree due to the lack of abscis-

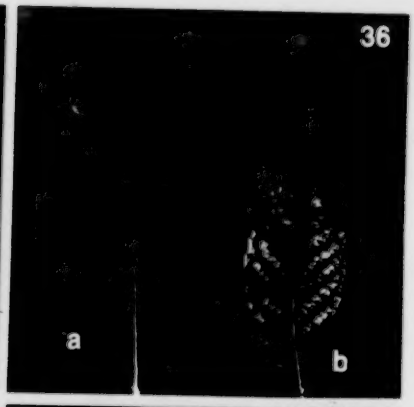
---

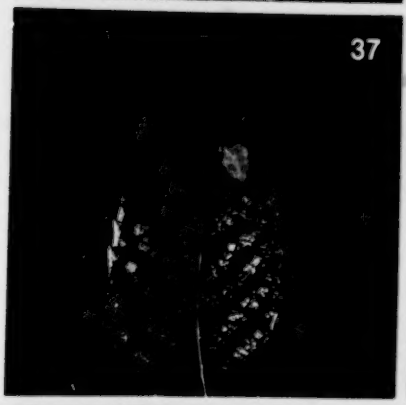
NATURAL STRESSES—CLIMATE. Drought, winter drying, flooding, natural senescence, frost, and temperature symptoms on forest vegetation (Figs. 18-33).

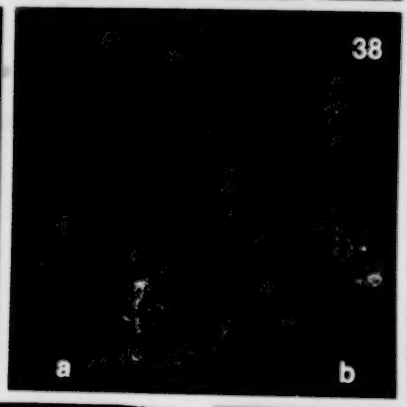
Drought: Fig. 18. Reddish brown discoloration of needles on a white spruce seedling. **Fig. 19.** Leaf necrosis of poplar. **Winter drying: Fig. 20.** Bud damage to aspen. The patchy foliage that occurs the following year can also be frost induced. **Fig. 21.** Red belt of lodgepole pine. **Flooding: Fig. 22.** Premature aging (senescence) of aspen foliage caused by flooding of a stand adjoining a black spruce wetland. **Natural senescence: Fig. 23.** Fall discoloration of aspen leaves prior to leaf drop. **Hail: Fig. 24.** Unidirectional damage to pine branches. **Frost: Fig. 25.** New foliar flush of pine showing first droop symptoms. **Fig. 26.** Needle injury on a new foliar flush of pine. **Fig. 27.** Partial necrosis of pine needles. **Fig. 28.** Injury on a new foliar flush of white spruce (young needles in final necrotic stage). **Fig. 29.** Desiccation and necrosis of an aspen leaf. **Temperature: Fig. 30.** Winter flecking on a pine branch, caused by reflected sunlight. **Fig. 31.** Close-up of winter flecking on pine needles. **Fig. 32.** Browning of white spruce foliage, caused by heat from a nearby forest fire. **Fig. 33.** Bleaching and brown discoloration of white spruce foliage caused by severe heat from a forest fire.

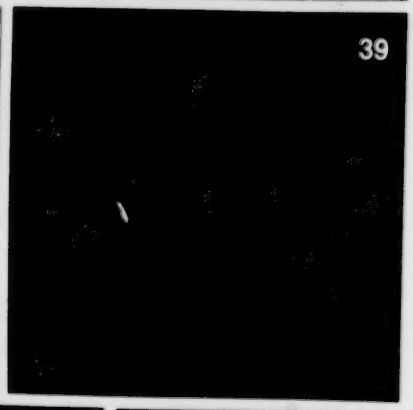

34
a
b

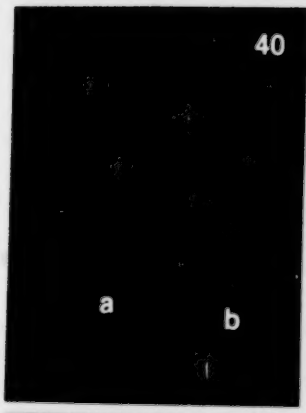

35


36
a
b


37

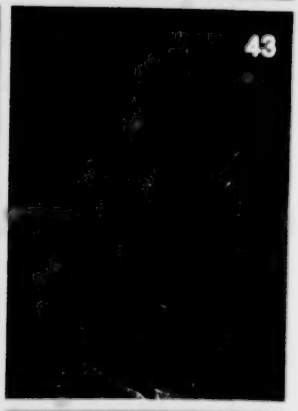

38
a
b


39


40
a
b

41

42


43

44

45

46

47

sion layer formation. The cambium and buds are often killed during this process, and only partial foliar development occurs the next growing season. Repeated red belt injury has been known to kill trees.

EXCESSIVE MOISTURE

Much of the boreal forest is poorly drained. Excessive moisture can cause severe injury (foliar discoloration) to many forest species, mainly because of a lack of oxygen for the root system. Species such as black spruce and tamarack, however, can withstand excessive moisture for a considerable part of the year. Deciduous species on sites close to wetlands can develop flood tolerance but tend to have early foliar senescence when high water persists throughout the summer (Fig. 22). Foliar symptoms produced as a result of flooding are similar to those produced during fall senescence (Fig. 23). If flooding persists for several seasons, tree death occurs.

HAIL

Hail can damage forests by causing stem lesions, breaking crowns and branches, and defoliating trees (Fig. 24). Hail damage can usually be diagnosed because it is often unidirectional on stems or branches and its pathway can be easily discerned from the air. The injured foliage and branches may provide favorable conditions for diseases to infect the tree. Severe hailstorms can kill trees.

TEMPERATURE AND LIGHT

Extreme or rapidly fluctuating temperatures are common causes of forest injuries. Late spring and late summer frosts are the most common causes of frost damage to foliage, buds, and shoots. In conifers, wilting of young foliage is the first symptom of frost injury (Fig. 25) following a late spring frost. Wilting is generally followed by tissue discoloration and necrosis (Figs. 26-28). Clumping of aspen foliage can be caused by winter drying (Fig. 20) but may also result from frost damage, especially along the foothills. Low temperatures in winter may result in frost cracks in main stems.

In deciduous species, frost symptoms develop first on the leaf margin and progress toward the central portion of the leaf. Tissue necrosis caused by frost spreads rapidly, without any prolonged chlorosis (Fig. 29).

High temperatures combined with exposure of vegetation to bright sun can result in defoliation, leaf burn, or bark scorch. This kind of injury occurs where stand openings were made recently along roads or cut lines. Reflected sunlight is considered responsible for winter flecking of conifer foliage (Figs. 30 and 31).

Browning and bleaching of leaves from high temperatures associated with forest fires (Figs. 32 and 33) are sometimes similar to symptoms caused by air pollutants. Signs of fire or charred wood near the affected vegetation should identify fire as the cause.

NATURAL STRESSES—NUTRIENT DEFICIENCY. Nitrogen, potassium, phosphorus, iron, and sulfur deficiency symptoms on forest vegetation (Figs. 34-47). Note: With the exception of Fig. 45, all foliar symptoms shown here were produced on plants grown in greenhouse facilities under controlled conditions.

Nitrogen deficiency: Fig. 34. White spruce seedlings showing **(a)** normal growth and coloration and **(b)** a nitrogen deficiency. **Fig. 35.** Chlorosis of white spruce. **Fig. 36.** Willow leaves showing **(a)** normal growth and coloration and **(b)** a nitrogen deficiency. **Fig. 37.** Close-up of Fig. 36(b) showing chlorosis of willow. **Fig. 38.** Birch leaves showing **(a)** normal growth and coloration and **(b)** a nitrogen deficiency. **Fig. 39.** Close-up of Fig. 38(b) showing discoloration of a birch leaf. **Potassium deficiency: Fig. 40.** Pine needles showing **(a)** normal growth and coloration and **(b)** a potassium deficiency. **Fig. 41.** Stunted growth, distortion, and chlorosis of a new foliar flush of poplar. **Fig. 42.** Bleaching of birch. **Phosphorus deficiency: Fig. 43.** Uneven growth and discoloration of birch. **Iron deficiency: Fig. 44.** Yellowing of a new needle flush of pine. **Fig. 45.** Stunted growth and foliage discoloration of a pine seedling caused by a combination of nitrogen, potassium, and phosphorus deficiences. **Sulfur deficiency: Fig. 46.** Chlorosis of willow. **Fig. 47.** Light chlorosis of birch.

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

Suggested Reading

Kramer, P.J. and T.T. Kozlowski. 1960. Physiology of trees. McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario.

Linzon, S.N. 1962. Hail damage to white pine and other trees. Forestry Chronicle 38:497-504.

Robins, J.K. and J.P. Susut. 1974. Red belt in Alberta. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Northern Forest Research Centre. Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-99.

Zalasky, H. 1976. Frost damage in poplar on the prairies. Forestry Chronicle 52:61-64.

NUTRIENT DEFICIENCY

A nutrient deficiency is a common natural stress in forest vegetation. The uptake and utilization of nutrients by plants can be affected by (1) absence of nutrients in an available form, (2) lack of soil aeration, (3) changes in soil pH that cause a change in nutrient solubility, (4) lack of soil moisture, and (5) lack of microbial activity needed for nutrient cycling.

Generally, nutrient deficiencies are difficult to detect because their symptoms are nonspecific; deficiency symptoms such as reduced growth rate and slight discoloration of foliage are not easily discerned. If a nutrient problem is suspected as the cause of forest injury, the foliage and soil should be chemically analyzed to confirm the diagnosis.

A **nitrogen deficiency** in conifers can cause stunted growth and chlorosis of the needles (Figs. 34 and 35). A nitrogen deficiency in deciduous species such as willow and birch also results in reduced leaf growth and chlorosis (Figs. 36-39).

Potassium deficiency symptoms in conifers appear first in young foliage. New growth is stunted and appears to lack normal chlorophyll development (Fig. 40). Similarly, in deciduous species a potassium deficiency results in stunted growth, distortion of foliage, and mild chlorosis or bleaching (Figs. 41 and 42).

A **phosphorus deficiency** also leads to stunting of foliage and retarded leaf development. Variegated leaves are often produced on deciduous plants as a result of phosphorus (Fig. 43) or other nutrient deficiencies. The intensity of color change is usually difficult to detect, however.

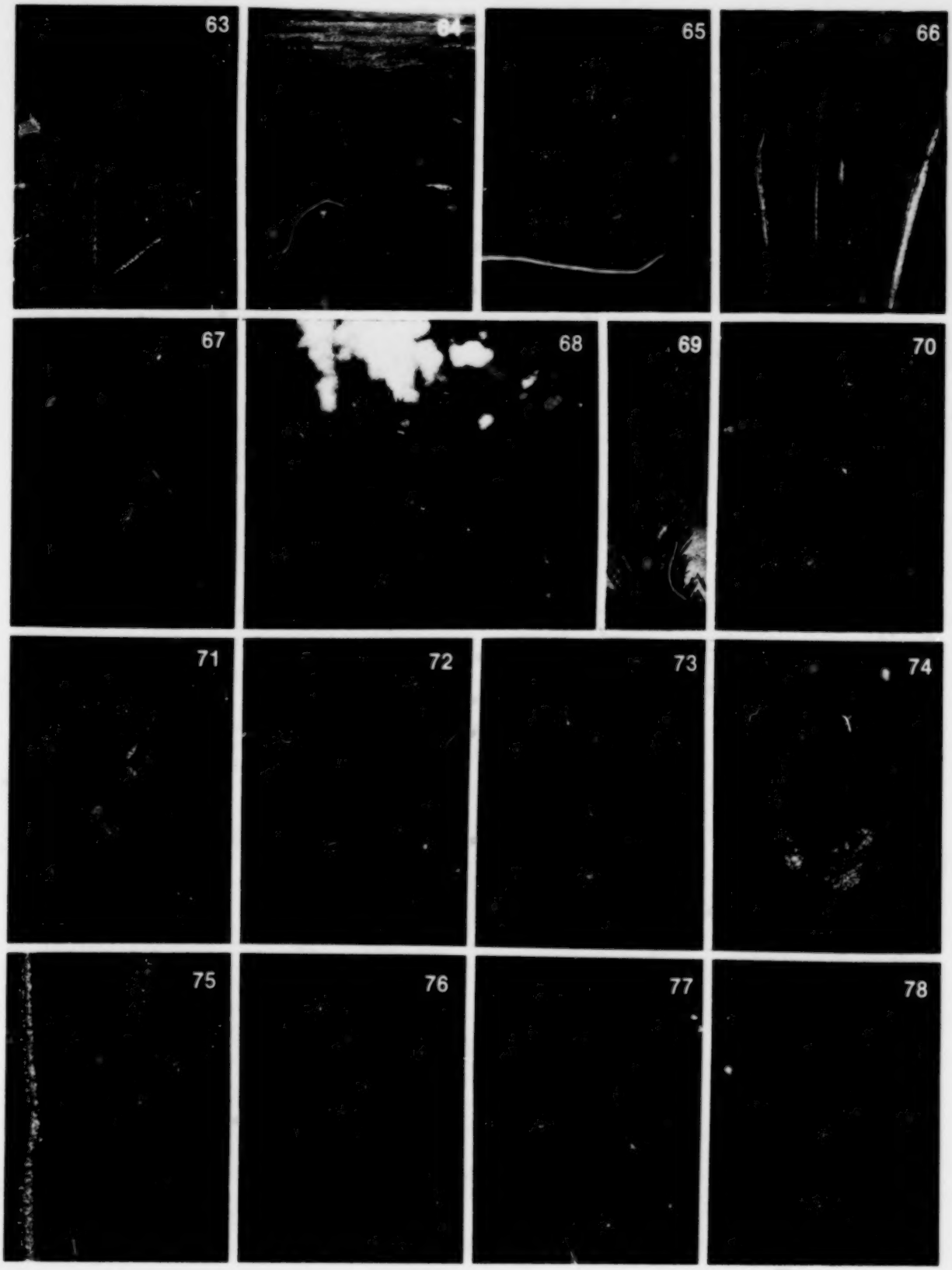
An **iron deficiency** is generally uncommon in the boreal forest but can produce chlorotic symptoms on young foliage (Fig. 44).

It is not uncommon for boreal forest species to show symptoms of combined nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies (Fig. 45). Such symptoms, which may be similar to individual nutrient deficiency symp-

---

NATURAL STRESSES—DISEASES. Disease symptoms on forest vegetation (Figs. 48-62).

Fig. 48. Discoloration and needle cast on black spruce caused by snow blight. Injury is limited to branches covered by winter snow. **Fig. 49.** Spruce needle cast infection on older white spruce foliage. **Fig. 50.** Discoloration of current-year white spruce foliage caused by spruce needle rust. **Fig. 51.** Close-up of spruce needle rust pustules on white spruce. **Fig. 52.** Examples of **(a)** normal vs. **(b)** *Elytroderma* needle-cast-infected pine seedlings. **Fig. 53.** *Elytroderma* needle cast affecting only 1-year-old pine needles. **Fig. 54.** Black fruiting structures of *Elytroderma* needle cast on pine needles. **Fig. 55.** Yellow witches'-broom on white spruce, caused by dwarf mistletoe. **Fig. 56.** Injury to birch caused by birch leaf rust. **Fig. 57.** Willow leaf rust pustules on the undersurface of a willow leaf. **Fig. 58.** Leaf spot on poplar. **Fig. 59.** Shoot blight injury on aspen showing leaf discoloration, blackening, and typical hook formation. **Fig. 60.** Chlorotic pine foliage due to *Armillaria* root rot. **Fig. 61.** *Armillaria* root rot of a pine root system showing white mycelial felt that prevents normal transport of nutrients to the foliage. **Fig. 62.** Top dieback of a birch stand caused by an unknown root disease.


63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78

toms, are most prevalent in young seedlings or actively growing tissues.

A **sulfur deficiency** in conifers results in reduced needle growth and intense chlorosis. In deciduous species it causes stunted growth and marginal and interveinal chlorosis (Figs. 46 and 47).

Other micronutrients such as copper, manganese, molybdenum, zinc, and boron are usually available in adequate amounts. **Boron** is perhaps worthy of note; its deficiency in forest tree species can be responsible for the rosetting of buds and injury to stem tips.

Suggested Reading

Hacskaylo, J., R.F. Finn, and J.P. Vimmerstedt. 1969. Deficiency symptoms of some forest trees. Ohio Agricultural Research and Development Centre. Wooster, Ohio. Research Bulletin 101.

Treshow, M. 1970. Environment and plant response. McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario.

DISEASES

Many diseases induce physical symptoms similar to those produced by air pollutants. In the forest, most infectious plant diseases are caused by fungal pathogens. Infectious agents of lesser importance are nematodes, bacteria, viruses, and higher plant species such as mistletoe. Only brief coverage of tree and shrub diseases is given here, sufficient to indicate the variety of causal organisms and symptoms. Other texts, such as those listed as suggested reading, should be consulted for more detail. The diagnosis of most diseases involves recognizing the disease symptoms developing on leaves and verifying the presence of pathogens through microscopic examination.

In conifers, **snow blight** (Fig. 48), **needle cast** (Fig. 49), and **needle rust** (Fig. 50) cause foliar lesions and discoloration similar to those produced by heavy metals; these symptoms are followed by premature needle drop. The fungi responsible for these diseases are present in the needle tissues as fungal hyphae and sometimes as pustules (Fig. 51).

Some foliar diseases are systemic, invading cambium and apical tissues and causing severe injury to actively growing trees. The major systemic infections in the boreal forest are **Elytroderma** and **dwarf mistletoe**. *Elytroderma* of pine is caused by a fungal infection that ultimately results in stem deformation and needle mortality (Figs. 52-54). Dwarf mistletoe is a parasite that invades pine (and sometimes spruce) through the needles and moves into the bark and cambium. Many infected trees develop bushy or broomlike structures from which the mistle-

---

NATURAL STRESSES—INSECTS. Insect symptoms on forest vegetation (Figs. 63-78).

Fig. 63. Needle defoliation of white spruce caused by the spruce budworm. **Fig. 64.** Aerial view of jack pine budworm injury to pine. **Fig. 65.** Close-up of jack pine budworm injury to pine. **Fig. 66.** Northern lodgepole pine needle miner entrance holes and injury on pine. **Fig. 67.** Spruce needle miner injury on white spruce. **Fig. 68.** White spruce needles wilting as a result of white pine weevil attack. **Fig. 69.** Pine needles dying as a result of lodgepole terminal weevil attack. **Fig. 70.** Spruce spider mite webbing and injury on white spruce. **Fig. 71.** Unknown defoliator insect injury on birch. **Fig. 72.** Injury to birch caused by the ambermarked birch leaf miner. **Fig. 73.** Injury to aspen caused by the cottonwood leaf-mining beetle. **Fig. 74.** Leaf miner injury on willow. **Fig. 75.** Injury on willow due to insect feeding or egg laying. **Fig. 76.** Injury on birch caused by a leaf-mining insect. **Fig. 77.** Leaf-rolling symptoms and skeletonized feeding injury on aspen caused by the early aspen leaf curler. **Fig. 78.** Injury on willow most likely caused by an *Eriophyes* gall mite.

toe plants obtain support, water, and most other nutrient requirements (Fig. 55).

Infectious diseases in deciduous trees also produce symptoms that can be mistaken for those caused by pollutants. **Rust**-infected leaves generally show a yellowish discoloration that leads to early senescence (Figs. 56 and 57).

A wide variety of other diseases such as **leaf spot, shoot blight,** and **powdery mildew** also invade tree leaves (Figs. 58 and 59). Symptoms range from irregularly shaped, discolored spots to complete necrosis. Shoot blight may be common following a wet spring; the symptoms are shriveling and blackening of the tender new growth (Fig. 59).

Root diseases may produce foliar symptoms somewhat similar to those produced by airborne pollutants. In conifers, foliar discoloration is generally the first obvious symptom of **Armillaria** root rot (Fig. 60) and is followed by wilting, drying, and necrosis from the reduction of water and nutrient transfer from the root system to the crown. Examination of the root collar often reveals resinosis and decay (Fig. 61). In deciduous species, root disease symptoms often begin with a gradual dieback of the uppermost foliage and branches that progresses downward until the entire tree dies (Fig. 62).

Suggested Reading

Bega, R.V. 1978. Diseases of Pacific coast conifers. United States Department of Agriculture, Forest Service. Agriculture Handbook 521.

Boyce, J.S. 1961. Forest pathology. McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario.

Peterson, G.W. and R.S. Smith, Jr. 1975. Forest nursery diseases in the United States. United States Department of Agriculture, Forest Service. Agriculture Handbook 470.

Ziller, W.C. 1974. The tree rusts of western Canada. Environment Canada, Canadian Forestry Service. Ottawa, Ontario. Publication 1329.

INSECTS

Insect injury to vegetation may be distinguished from pollutant injury by the presence of the insect in one of its various life forms. The only problem is that some life forms might not be easily detected. In general, insects are restricted to the known range of hosts they attack, and some are confined to one specific host or group of hosts.

CONIFEROUS SPECIES

Defoliation of conifers is typical of the feeding damage caused by such insects as the **spruce budworm** (Fig. 63), **jack pine budworm** (Figs. 64 and 65), and various **sawfly species** attacking pine, spruce, tamarack, and balsam fir. Partially eaten needles left by these insects provide diagnostic clues. Pine and spruce foliage are frequently attacked by **needle-mining insects** (Figs. 66 and 67) that enter the needle and feed on the succulent inner tissues. Entrance and exit holes made by larvae, mined-out needles, and the presence of larvae are characteristic identifying features.

Leader shoots of spruce and pine are girdled and killed by **weevil larvae** (Figs. 68 and 69) that bore into them. **Gall midges** and **shoot-boring sawflies** may also cause damage to buds and shoots.

The **spruce spider mite,** barely visible to the naked eye, may cause severe injury to the foliage of spruce by sucking juices from the needle tissues. When the insect is abundant, symptoms of damage include silken webbing and yellowing of needles (Fig. 70).

DECIDUOUS SPECIES

On deciduous trees a wide variety of insect species may cause injury that ranges from partly chewed leaves (Fig. 71) to total defoliation by such notorious insects as the

forest tent caterpillar. Various **leaf-mining** and **leaf-skeletonizing species** are also common (Figs. 72-77).

Some **leaf-mining species** may cause green to brown blotches on leaves (Figs. 72, 74, and 75), while others may leave a narrow trail as they feed through the leaf (Fig. 76). Certain **leaf-roller species** curl the leaf and tie it with silk so as to provide a protective sheath in which to feed and rest (Fig. 77). Another common sign of insect and mite damage on foliage, buds, and shoots is **galls** These abnormal growths appear in various shapes, sizes, and colors. Because gall-forming insect and mite species are highly specialized, each produces a characteristic gall (Fig. 78) as a result of feeding behavior and secretions.

Some **bark beetle** and **wood-boring species** confine their attack to the bark, cambium, and outer sapwood layer, whereas others may penetrate deep into the wood. While doing so, some species act as carriers for disease-causing fungi, bacteria, or viruses. The **mountain pine beetle** and its blue-stain fungal associates are an example of a complex insect-fungus relationship that kills the host pine tree (Safranyik *et al.* 1974). **Dutch elm disease** is caused by a fungus whose spores are usually carried to healthy American elms by two bark beetles common in North America. Symptoms of the disease are wilting followed by yellowing, death of branches, and ultimately death of the tree.

Suggested Reading

Furniss, R.L. and V.M. Carolin. 1977. Western forest insects. United States Department of Agriculture, Forest Service. Miscellaneous Publication 1339.

Johnson, W.T. and H.H. Lyon. 1976. Insects that feed on trees and shrubs. An illustrated practical guide. Cornell University Press. Ithaca, New York.

Rose, A.H. and O.H. Lindquist. 1973. Insects of eastern pines. Environment Canada, Canadian Forestry Service. Ottawa, Ontario. Publication 1313.

Rose, A.H. and O.H. Lindquist. 1977. Insects of eastern spruce, fir and hemlock. Environment Canada, Canadian Forestry Service. Ottawa, Ontario. Forestry Technical Report 23.

Safranyik, L., D.M. Shrimpton, and H.S. Whitney. 1974. Management of lodgepole pine to reduce losses from the mountain pine beetle. Environment Canada, Canadian Forestry Service. Ottawa, Ontario. Forestry Technical Report 1.

FOREST VEGETATION AND POLLUTANT STRESSES

When any air pollutant impinges upon the forest, a number of factors come into play to determine what effect the pollutant will have on the vegetation. A wide range of effects is possible, depending upon the interaction of the biological characteristics of the vegetation species, the nature of the pollutant, and the environmental conditions.

BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF VEGETATION

The tolerance or sensitivity of vegetation to pollutants is dependent upon (1) genetic makeup; (2) age, health, vigor, and state of metabolic conditions; and (3) rate of pollutant uptake and accumulation as determined by species morphology and anatomy. The varying sensitivities of individual plants to pollutant injury may be due to differences in genetic constitution, which controls the biochemical and physiological tolerance for the pollutant. Foliage at different stages of development also may exhibit different degrees of sensitivity to the same pollutant. Old jack pine needles, for example, are more sensitive to chronic levels of SO_2 than are young but fully developed needles. An immature (tender) new flush, however, is more sensitive to SO_2 than older needles. Because of their high rate of metabolic activity, young but fully developed needles can assimilate more SO_2 than old and metabolically less active needles. A pollutant becomes toxic within the tissues once it accumulates beyond a certain level.

NATURE, CONCENTRATION, AND EXPOSURE TIME OF POLLUTANTS

The nature of a pollutant is defined by its chemical characteristics, its persistence, and the phytotoxicity of possible chemical transformations. The response of vegetation to air pollution depends upon the concentration of the pollutant and length of exposure time.

High concentrations of pollutants often produce an immediate and acute impact with some easily recognizable symptoms. Low concentrations, however, produce more subtle or chronic effects that develop gradually and are not always readily identifiable. Vegetation can respond to pollutant emissions at individual or population levels. The impact at the individual level is generally caused by low levels of pollutants, whereas that at the population level is brought about by toxic levels. If the plants are exposed to a pollutant mixture, as is the case under field conditions, the total effect may be synergistic, additive, or antagonistic.

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Plant response to air pollutants is partially governed by a number of environmental factors such as ambient temperature, light, relative humidity, soil moisture, nutrient status, and time of year. In general, the environmental conditions that are most conducive to plant growth also produce the maximum air pollution response; in winter, when plants are dormant, air pollution injury is minimal. Other factors such as wind direction, wind speed, and temperature inversions are also important, for these ambient conditions determine the dispersal and dilution of the pollutants and the ability of the forest to act as a receptor.

Vegetation weakened by stresses such as adverse climatic conditions, a nutrient deficiency, or disease and insect disorders responds to air pollution much more readily and severely than healthy vegetation. Vegetation under stress prior to even mild air pollution episodes may not possess an adequate defense mechanism to protect itself against pollutant injury.

NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY

Because fossil fuel deposits often contain large quantities of sulfur, their processing and refining to produce natural gas and petroleum products result in emissions containing considerable amounts of potentially harmful compounds. Emissions from oil sands plants and other petroleum industries consist mainly of sulfur dioxide and nitrogen oxides and small quantities of organic compounds, heavy metals, and particulate matter. Sulfur dioxide is also the major air pollutant in emissions from natural gas processing plants; small amounts of hydrocarbons, nitrogen oxides, and hydrogen sulfide are released as well.

Natural gas processing plants generally convert sulfur compounds into elemental sulfur or sulfuric acid, with varying degrees of efficiency. Depending upon the original levels of sulfur compounds and the efficiency of the sulfur extraction process, varying amounts of SO_2 are continually released into the environment. Intermittent release of large quantities of SO_2 can also occur as a result of various industrial activities or accidents such as emergency flaring, breakdown of sulfur extraction equipment, elemental sulfur fires, and gas and oil well blowouts that occasionally catch fire.

SULFUR DIOXIDE

Sulfur dioxide is the predominant air pollutant from the oil and gas industry and by itself produces a set of well-defined symptoms on forest species. Many of the photographs of SO_2 symptoms in this section come from vegetation affected by sulfur-block fire incidents in which SO_2 was the only emission involved.

Sulfur dioxide, as either a gas or one of its oxidized forms (sulfite and sulfate), is extremely soluble in water. It has been reported that SO_2 and its other forms are toxic to vegetation only when dissolved in aqueous solution. Recently it has been suggested that, given moist conditions, dissolved but undissociated SO_2 would likely be the most biologically active (phytotoxic) chemical form for plant injury. The concentration of this chemical form under normal conditions is about 1/1000 of the total SO_2 present in water.

PHYTOTOXICITY

Sulfur is an essential element for plant metabolism because it is an important component of amino acids, proteins, and some vitamins. In healthy vegetation, sulfur content varies from 500 to 14 000 ppm by dry weight, depending upon the species. Plant tissue sulfur levels below 250 ppm are considered critical, giving rise to deficiency symptoms and to the substitution of selenium (when available) for sulfur in amino acids and proteins. Part or all of the sulfur requirements of plants may be met by direct uptake of SO_2 from the atmosphere if it is present at a very low concentration; if the concentration of SO_2 increases beyond a certain critical level, photosynthesis, respiration, and other fundamental cellular processes are impaired. As the concentration of SO_2 and length of exposure time increase, the injury becomes irreversible and leads to death.

It is often assumed that there has been no injury to vegetation until visible symptoms of phytotoxicity develop. This can be misleading, however. In many greenhouse studies, for example, SO_2 was shown to have reduced the growth and yield before any visible symptoms appeared. It is now commonly believed that the initial injury takes place at the biochemical level (interference with photosynthesis, respiration, etc.) and progresses to the ultrastructural level (disorganization of cellular membranes responsible for controlling cellular and intracellular transport of nutrients and other metabolites) then cellular level (cell wall, mesophyll, and nuclei breakdown). Finally, visible symptoms develop (chlorosis and necrosis of foliar tissues). Because this handbook is intended to be a diagnostic tool for use in the field, the major emphasis here is on visible symptoms only.

The deposition of large quantities of SO_2 on soils can alter soil characteristics

sufficiently to cause indirect injury to the vegetation growing there. Such plant injury or depressed growth results from (1) chemical acidification of soils, (2) soil nutrient impoverishment due to increased nutrient solubility and consequent leaching, (3) changes in soil microflora (responsible for nutrient cycling) due to increased acidity, and (4) release of phytotoxic elements under acidic conditions. For example, aluminum (normally present as aluminum silicate) and manganese become readily available to vegetation in acidic soil and are phytotoxic to many species.

The following table ranks the major boreal forest tree species by their sensitivity to SO_2 as indicated by visible symptoms.

Table 1. Ranking of boreal forest tree species by sensitivity to SO_2*

Highly sensitive	Moderately sensitive	Relatively tolerant
Alpine fir	Balsam poplar	Black spruce
Balsam fir	Jack pine	White spruce
Green alder	Lodgepole pine	
Tamarack	Trembling aspen	
White birch	Willow	

* Trees are listed alphabetically.

Depending upon its concentration and exposure time, SO_2 can cause a variety of visible symptoms on forest vegetation. These symptoms can be classified as acute, chronic, and transitory.

Acute injury occurs during the growing season at SO_2 levels of 0.25-0.30 ppm over varying lengths of time. On conifers, acute symptoms include the sudden and widespread chlorosis of older needles followed generally by brown discoloration, desiccation, and necrosis. In deciduous trees, SO_2 fumigation causes a wet appearance and light chlorosis of the undersurfaces of leaves, which is a result of leakage of cellular fluids through the cell walls. Upper surfaces do not show wetting because of their wax covering. Symptoms develop when the concentration of various ionic forms of SO_2 in the tissues reaches a level higher than that which can normally be assimilated by the plant metabolism. The initial chlorotic symptoms are similar to symptoms of natural senescence.

Chronic injury results from periodic fumigations of sensitive species with varying concentrations of SO_2 (0.10-0.25 ppm) over a period long enough to partially disrupt one or more metabolic processes. When such disruptions occur continuously over an extended period, chronic injury symptoms such as persistent chlorosis and stunted growth start to develop. In conifers, extensive chronic injury can result in premature needle drop. Similarly, in deciduous trees, such injury over the entire leaf surface can cause early foliar death.

Transitory symptoms are brought about by low levels of SO_2 (less than 0.30 ppm) over relatively short intervals. Such exposures cause temporary chlorosis. The foliage recovers fully within a matter of days in an SO_2-lean or SO_2-free environment. Transitory symptoms are a result of partial degradation of chlorophyll, but the metabolic processes responsible for chlorophyll production are not affected permanently.

SYMPTOMS ON CONIFEROUS SPECIES

In general, SO_2 produces similar symptoms on all conifers. For example, symptoms of acute SO_2 fumigations on white spruce (Fig. 94) and black spruce (Fig. 91) are similar to those produced on pine (Figs. 81 and 89).

Visible symptoms on forest species depend on the SO_2 impingement pattern and species sensitivity. In mixed stands, spruce trees, which are relatively tolerant to SO_2, will often remain unaffected even though pine and deciduous species show foliar discoloration (Fig. 79). Injury to older trees ranges

from severe crown decline to complete tree mortality after recurrent attacks (Figs. 79 and 83).

Under acute SO_2 levels, current-year pine needles rapidly develop chlorosis (Fig. 80) followed by needle browning, desiccation, and necrosis (Fig. 81). Young seedlings can occasionally be killed by a single acute fumigation because of resulting drying and death of vital tissues (Fig. 82).

Acute SO_2 fumigation occurring immediately after spring flush can cause severe injury to new growth. The new tissue is very tender and growing rapidly (Fig. 84) and is thus extremely sensitive. If fumigation occurs before bud break, uninjured buds may break dormancy and unaffected new foliage will emerge (Figs. 88 and 89). In young mature needles, discoloration appears first at the tip and progresses toward the base (Figs. 85-87). All or part of the needle may be injured. Tissue chlorosis generally appears adjacent to the necrotic zone. Needles that are only partially affected by a single fumigation are subject to further injury by subsequent fumigations, and this results in the development of injury bands corresponding to different SO_2 episodes.

In trees with several years' foliage, the most sensitive tissue to an acute SO_2 fumigation is the new, tender foliage developing after spring flush. Next in sensitivity are the oldest needles, which are more susceptible than the younger but mature ones. The younger needles, because of their higher rate of metabolic activity, can assimilate more sulfur into their normal metabolism than the older needles with a much slower rate of metabolic activity. Because of these differing sensitivities, the oldest mature needles can drop prematurely, while the young ones remain nearly unaffected (Fig. 90). Conifers extensively affected by SO_2 exhibit both dead buds and premature needle drop (Fig. 91).

Occasionally conifer needles exhibit differential responses to chronic concentrations of SO_2 so that some needles are more stunted than the others. This is due to varying SO_2 concentrations and the diversion of nutrients from more affected tissues to less affected ones, which eventually results in uneven growth (Figs. 92 and 93). Another type of differential response is caused by exposure of a tree crown to SO_2 fumigations. That portion of the crown exposed to directional fumigation may develop more intense injury symptoms than the rest of the crown.

In chronic injury, visible symptoms are restricted to various degrees of persistent foliar chlorosis (Figs. 92 and 93). The foliage is not lost immediately, but normal growth and yield are reduced. Extensive chronic injury to conifers can cause a reduction in needle retention time. Vegetation exposed to nonpollutant stresses such as winter flecking (Figs. 30 and 31) can be predisposed to severe SO_2 injury.

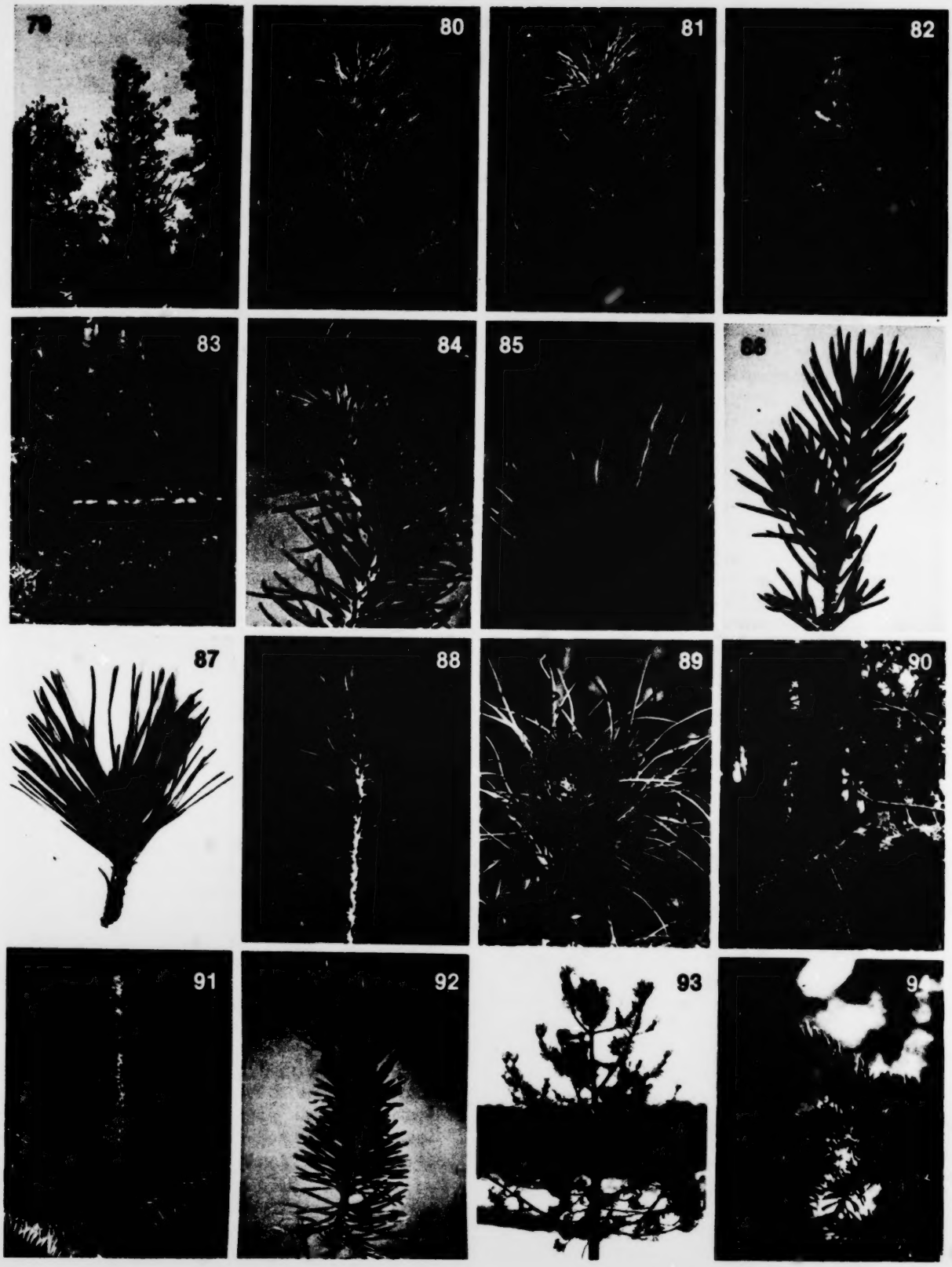
SYMPTOMS ON DECIDUOUS SPECIES

After exposure of deciduous species to high concentrations of SO_2, symptoms of acute injury progress rapidly. Birch, one of the most SO_2-sensitive deciduous species, exhibits foliar symptoms ranging from light chlorosis to almost complete necrosis between veins (Figs. 95-98). The initial chlorotic symptoms of SO_2 exposure on poplar and willow leaves (Figs. 99 and 100) are similar to those on birch leaves in the initial stages of injury following acute or chronic fumigation.

The first visible symptoms of SO_2 exposure on deciduous species are wetting of the leaf undersurface and light chlorosis (Fig. 101). After prolonged fumigation with SO_2, the water-soaked appearance is followed by severe chlorosis and browning around the edges and between the veins (Figs. 102-106) and eventually by extensive discoloration (Fig. 107). Discoloration progresses rapidly and is accompanied by leaf curling and shriveling in response to the rapid drying of leaf tissues.

Well-formed buds rarely display SO_2 injury because of their protective scales. However, buds and young foliage can be injured if subjected to a severe fumigation a few days after the beginning of spring flush.

Visible symptoms of chronic SO_2 injury on deciduous foliage include chlorosis, which may be confined to a portion of the leaf (Fig. 102) or appears uniformly over the


79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94

whole leaf surface (Figs. 99 and 100), and premature leaf drop.

Transitory SO_2 injury to deciduous species is exhibited by a very light flecking of leaf margins and the interveinal area. Such injury usually goes undetected unless base-line information on normal vegetation is well established. Vegetation can recover fully from transitory injury, provided that the ambient air is free of SO_2 after the initial fumigation.

Higher-plant species of ground cover exhibit symptoms of SO_2 injury (Figs. 108-110) that are similar to those produced on deciduous trees. These symptoms include chlorosis, wet appearance, curling, shriveling, browning, and total necrosis. Tree canopies often protect the understory from high concentrations of SO_2 originating from an emission source above canopy height. Depending upon the atmospheric conditions and stack height, SO_2 injury may show up only on the overhead tree species, only on the ground cover, or on both.

Suggested Reading

Hindawi, I.J. 1970. Air pollution injury to vegetation. United States Department of Health, Education, and Welfare. National Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71.

Jacobson, J.S. and A.C. Hill (eds.). 1970. Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

Linzon, S.N. 1965. Sulphur dioxide injury to trees in the vicinity of petroleum refineries. Forestry Chronicle 41:245-247 and 250.

Linzon, S.N. 1978. Effects of airborne sulphur pollutants on plants. Pages 109-162 *in* Sulphur in the environment. Part II. Ecological impacts. J.O. Nriagu (ed.). J. Wiley and Sons Inc. New York.

Treshow, M. 1970. Environment and plant response. McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario.

United States Department of Agriculture. 1973. Air pollution damages trees. Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.

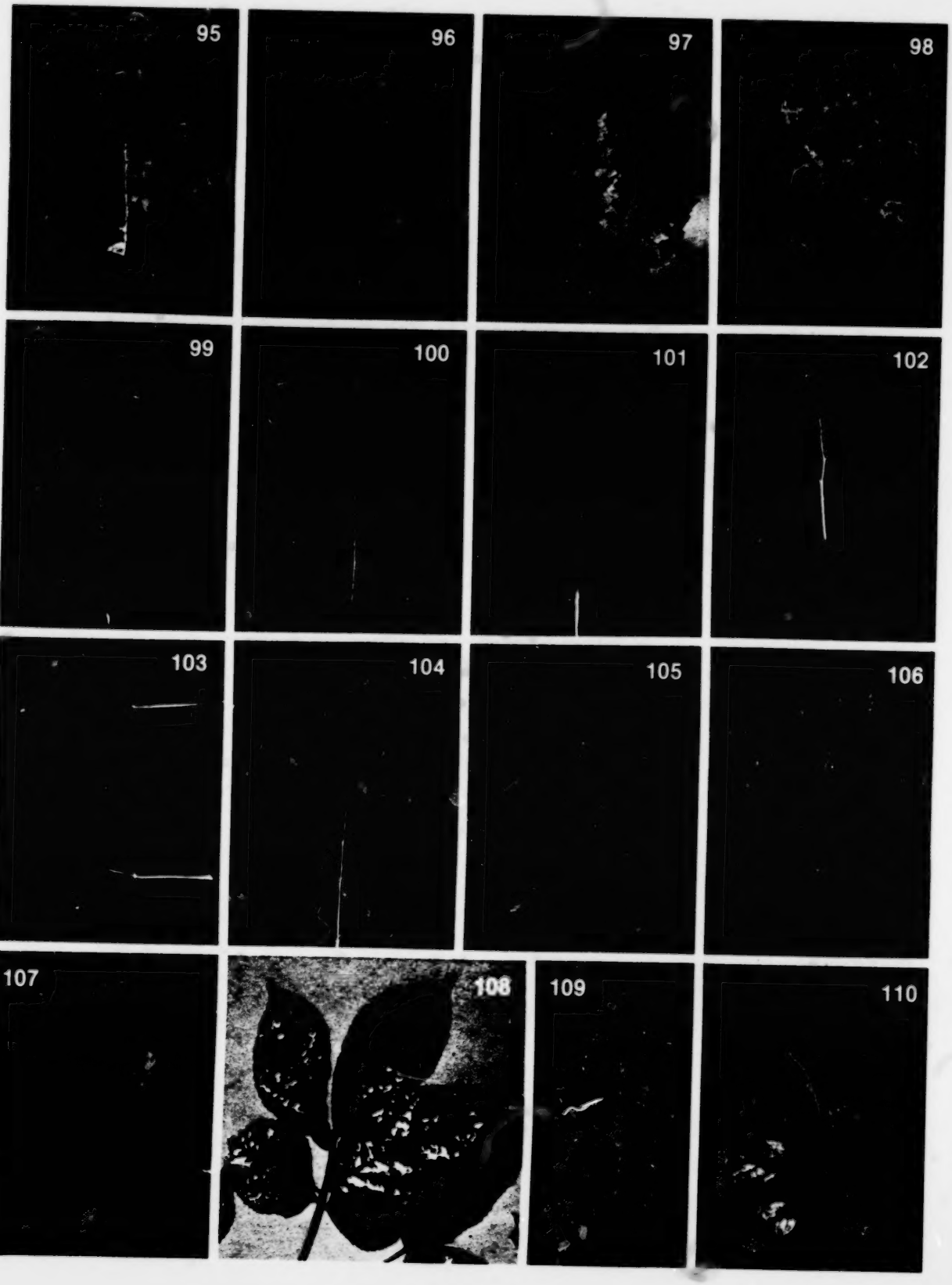
HYDROCARBONS

Hydrocarbons are released from the natural gas and oil industry as liquid or gaseous aerial emissions or as accidental oil spills. Aerial emissions generally consist of uncom-

---

POLLUTANT STRESSES—NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY. Sulfur dioxide emission symptoms on coniferous vegetation (Figs. 79-94).

Fig. 79. Foliar discoloration of pine and aspen. The pine (center) displays considerable necrosis, the aspen (left) shows extensive foliar discoloration, while the white spruce (right) is unaffected. **Fig. 80.** Needle chlorosis on a pine shoot 1 hour after an acute fumigation. **Fig. 81.** Needle browning and shoot desiccation of pine 2 days after an acute fumigation (same shoot as in Fig. 80). **Fig. 82.** Total necrosis of a pine terminal bud after an acute fumigation. **Fig. 83.** Complete foliar necrosis of balsam fir. Note premature needle drop. **Fig. 84.** Light brown discoloration of a new foliar flush of black spruce. **Fig. 85.** Typical pine needle necrosis progressing from the tip back. **Fig. 86.** Partial necrosis of white spruce needles. **Fig. 87.** Pine needle discoloration progressing from the tip back. **Fig. 88.** Uninjured black spruce bud that flushed after a single fumigation. **Fig. 89.** Flushing of a pine terminal bud after a single acute fumigation. **Fig. 90.** Loss of older white spruce needles. **Fig. 91.** Bud and needle necrosis and premature needle drop on black spruce. **Fig. 92.** Persistent chlorosis of pine resulting in partially stunted growth. **Fig. 93.** Stunted growth of pine as a result of highly variable fumigations. **Fig. 94.** Acute fumigation symptoms on white spruce foliage.


95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110

busted hydrocarbons from processing and refining plants, cracking of fuels and condensates, line ruptures or pressure control valve malfunctions on high-pressure gas pipelines, and gas and oil well blowouts. Oil spills can result from pipeline breaks, valve failure, storage tank leaks, and other spills.

Coal-powered electric generators release not only SO_2, nitrogen oxides, and trace metals but also appreciable amounts of a variety of hydrocarbons.

LIQUID HYDROCARBONS

The phytotoxicity of most hydrocarbons released from the petroleum industry is related primarily to the carbon chain length. In general, light-weight hydrocarbons (13 carbons or less) are more phytotoxic than heavy-weight ones (more than 13 carbons) because of the relative ease with which the light-weight hydrocarbons can penetrate the waxy cuticle of leaves and buds. Emissions from the natural gas and oil industry contain different proportions of light and heavy hydrocarbons, depending upon the nature of the underground formation. Heavy-weight hydrocarbons are less volatile than the light-weight varieties, and their injury to vegetation is primarily due to the physical coating of plant surfaces, which inhibits stomatal gas exchange and transpiration processes.

The impact of aerial emissions of hydrocarbons on forest vegetation and soils depends on the time of year in which the emissions are released. During the growing season, from late spring to early fall, tree foliage (deciduous and coniferous) is the major receptor of hydrocarbons, protecting the main stems and ground-cover species. However, in late autumn before the snow falls and in early spring before leafing out, coniferous foliage, branches of deciduous trees, and ground cover (including bryophytes and lichens) are all affected. In the winter, heavy snow on the ground can protect the ground-cover plants and soils against relatively small quantities of aerial emissions of hydrocarbons, allowing time for some of the more toxic hydrocarbons to volatilize and an opportunity for clean-up operations.

Another major source of hydrocarbon injury to forest vegetation and soils is land spills of oil. In winter, large-volume oil spills usually penetrate the snow cover and seriously affect the ground-cover species. Sometimes the oil is even hot enough to melt the snow, which increases the potential for damage. Oil can be phytotoxic when it seeps into the root zone and penetrates vital cambial tissues. It disturbs the moisture regime, affects the microbial populations in the soil that are responsible for nutrient cycling, and causes changes in soil pH and aeration. In areas of heavy spills, the lack of aerobic conditions results in very slow breakdown of the hydrocarbons. The breakdown process can be accelerated by properly draining the oil puddles, cultivating the area to facilitate soil aeration for microbial activity, supplying additional mineral nutrients, and adjusting the soil pH by adding lime.

Symptoms on Coniferous Species: Hydrocarbon sprays from incomplete combustion or oil well blowouts cause the crowns of conifers to turn black (Fig. 111). Generally only the foli-

---

POLLUTANT STRESSES—NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY. Sulfur dioxide emission symptoms on deciduous vegetation (Figs. 95-110).

Figs. 95-98. Progressive injury to birch leaves. **Fig. 95.** Initial chlorotic symptoms. **Fig. 96.** Chlorosis advancing to water-soaked appearance. **Fig. 97.** Brown discoloration and necrotic symptoms. **Fig. 98.** Advanced necrotic symptoms. **Fig. 99.** Initial chlorotic symptoms on poplar. **Fig. 100.** Initial chlorotic symptoms on willow. **Fig. 101.** Wetting effect on the undersurface of an aspen leaf. **Fig. 102.** Marginal and interveinal leaf chlorosis on aspen. **Fig. 103.** Marginal and interveinal necrosis on aspen as a result of an acute fumigation. **Fig. 104.** Advanced marginal and interveinal injury on poplar **Fig. 105.** Acute necrosis symptoms on willow. **Fig. 106.** Varying degrees of necrosis on alder. **Fig. 107.** Nearly complete discoloration of poplar leaves—chlorosis followed by necrosis—as a result of an acute fumigation. Leaves had curled but were straightened to show the injury. **Fig. 108.** Acute symptoms on wild sarsaparilla. **Fig. 109.** Advanced acute symptoms on Labrador tea. **Fig. 110.** Symptoms on prickly rose.

111

112

113

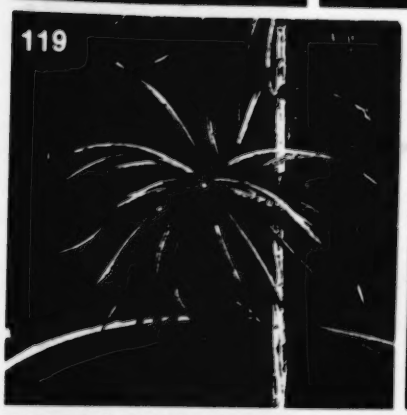
114

115

116

117

118

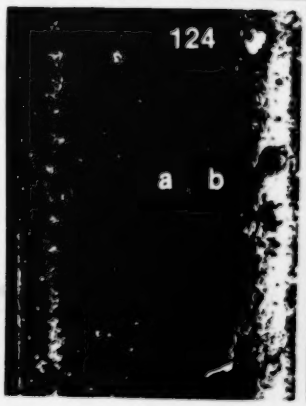

119

120

121

122

123



125

126

age directly exposed to the hydrocarbon spray gets coated (Fig. 112). Light-weight hydrocarbons cause rapid injury to vegetation, which results in defoliation within a few weeks (Fig. 113).

Light-weight hydrocarbons give an oily appearance to foliage (Fig. 114), whereas heavy-weight hydrocarbons leave a tarry coating (Figs. 115 and 116). Because heavy-weight hydrocarbons cannot easily penetrate into buds, new growth often results the following growing season (Fig. 115) and may be adequate for the tree's survival. Surface lesions and an oily sheen appear on coniferous needles (Fig. 117). Chlorotic symptoms start at the point of contact and are evident first on the younger needles (Figs. 118 and 119). If the vegetation is heavily coated by light-weight hydrocarbons, chlorosis is followed by general necrosis (Fig. 120) and eventually tree mortality. Dead tissues appear first at the needle tip and spread gradually to the needle base (Fig. 121). Such tissue necrosis is followed by premature needle drop and tree death (Fig. 122).

Hydrocarbons, especially the light-weight type, can severely curtail tree growth by penetrating the phloem conducting tissues and vital cambium tissues of the main stem (Fig. 123). Usually the side of the tree trunk facing the source receives the hydrocarbon deposit (Fig. 124a), and the side away from the source remains clean (Fig. 124b). Partial exposure of the tree trunk and foliage to hydrocarbons may result only in a temporary slowing of the growth rate.

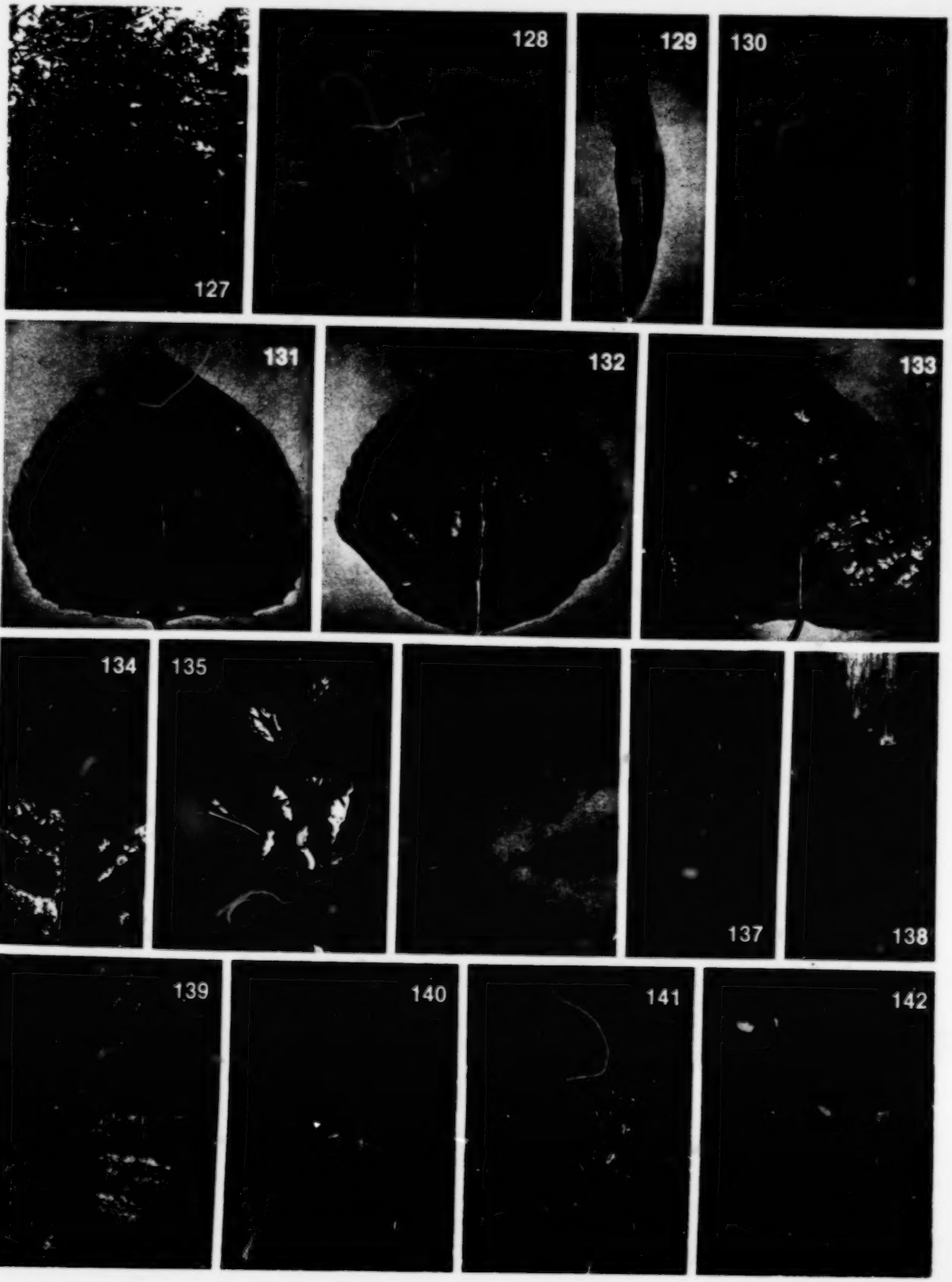
Other Species in Coniferous Stands: When hydrocarbon deposits saturate the soil organic layer, they are able to move down to the roots of shallow-rooted ground vegetation. The infiltrated chemicals can be so toxic to the roots that the ground vegetation dies (Fig. 125). Tree lichens are also very sensitive to hydrocarbon sprays. Visible external symptoms are an oily coating and brown discoloration of the thallus (Fig. 126). Sometimes, because of penetration of the oil, the dead lichen thallus does not become dry and brittle.

Symptoms on Deciduous Species: Deciduous foliage is more sensitive to hydrocarbons than coniferous foliage, perhaps because conifers have a well-developed cuticle. The symptoms associated with hydrocarbon release onto deciduous foliage include curling, distortion, and discoloration and occur within a few hours of application (Figs. 127-130). Defolia-

---

POLLUTANT STRESSES—NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY. Light- and heavy-weight hydrocarbon emission symptoms on coniferous vegetation (Figs. 111-126).

Fig. 111. White spruce crown coated with heavy-weight hydrocarbon spray released from a flare stack. **Fig. 112.** White spruce branch heavily coated with heavy-weight hydrocarbons. **Fig. 113.** White spruce crowns coated with light-weight hydrocarbons released from a flare stack. Note chlorosis and partial foliar drop, especially of older needles, due to hydrocarbon phytotoxicity. **Fig. 114.** White spruce branch showing partial necrosis as a result of a light-weight hydrocarbon spray. Note the hydrocarbon spotting on the needle surfaces. **Fig. 115.** One-year-old pine foliage coated with heavy-weight hydrocarbons. Current-year flush is free of coating, indicating that the incident occurred before bud break. **Fig. 116.** White spruce branch coated with heavy-weight hydrocarbons. **Fig. 117.** Injury pattern and oily sheen on pine needles revealed after removal of a light-weight hydrocarbon film. **Fig. 118.** Chlorotic symptoms first appearing on younger needles and tips of white spruce after a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 119.** Chlorotic symptoms on a tamarack shoot in response to a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 120.** Advanced necrosis on white spruce as a result of a heavy coating with light-weight hydrocarbons. **Fig. 121.** Partial necrosis on balsam fir needles after exposure to a light-weight hydrocarbon spray. Note the hydrocarbon spotting on the needle surfaces. **Fig. 122.** Premature needle drop and bud death on white spruce as a result of a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 123.** Cambial, phloem, and outer sapwood tissues of a white spruce trunk destroyed by the penetration of light-weight hydrocarbons through the bark. **Fig. 124.** Light-weight hydrocarbon coating of a tree trunk (a) on the side facing the emission source and (b) on the side away from the emission source. **Fig. 125.** Ground-cover vegetation totally destroyed as a result of a heavy spray of light-weight hydrocarbons. Note needle drop on the ground. **Fig. 126.** Injury (brown discoloration) to a tree lichen thallus caused by a spray of light-weight hydrocarbons.


127
128
129
130
131
132
133
134
135
137
138
139
140
141
142

tion occurs a few weeks later. Hydrocarbons cause localized injury to only the leaf area that is exposed (Fig. 131). Light-weight fractions spread evenly over the leaf surface to produce a distinct shiny appearance (Figs. 132-134). Symptom development often corresponds with the pattern of hydrocarbon deposition on the leaf surface. Hydrocarbons generally produce a curling and twisting response only in the foliar tissues (Figs. 135 and 136). Certain herbicides, on the other hand, can produce curling and twisting in all tissues, including twigs and branches.

Sprays of heavy-weight hydrocarbons, unless they are concentrated or have light-weight fractions, usually do not cause permanent injury to the buds, phloem, or cambium (Fig. 137). The buds produce new growth the next growing season. Mixtures of light- and heavy-weight hydrocarbons can permanently damage plant tissues by penetrating through the bud scales into the cambial layer (Fig. 138).

Other Species in Deciduous Stands: Ground vegetation is usually protected from hydrocarbon sprays by the tree canopy and is affected only if the spray is heavy enough to fall through the canopy or if the wind carries the spray near the ground. Most ground-cover species of higher plants respond to hydrocarbons much the same way as deciduous tree foliage. Light-weight hydrocarbons produce chlorosis and brown discoloration followed by marginal necrosis and leaf distortion (Figs. 139 and 140). Symptoms become more pronounced with time (Fig. 141). Eventually tissues above ground, including those of lichens and bryophytes, are severely affected (Fig. 142). If the hydrocarbons do not penetrate the root zones, new growth of higher plants may reappear after some time. The phytotoxic effects of an oil spill are persistent, and the vegetation will not reestablish until the hydrocarbons have been broken down by microbial action or removed by other means.

GASEOUS HYDROCARBONS

Ethylene, acetylene, propylene, and other related hydrocarbon compounds are secondary products of the incomplete combustion of natural gas, oil, coal, and other hydrocarbon resources. They may be present in variable amounts in gaseous emissions from natural resource extraction industries. Because the phytotoxicity of these gases is similar and because ethylene is the most common to occur around industrial areas (polyethylene manufacturing, coal- and gas-powered electric generators, etc.), ethylene will be discussed as typical of all of these gaseous hydrocarbons.

Ethylene is a normal product of plant metabolism, and at low concentrations it plays an important role in fruit ripening and

---

POLLUTANT STRESSES—NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY. Light- and heavy-weight hydrocarbon emission symptoms on deciduous vegetation (Figs. 127-142).

Fig. 127. Darkened and curled willow foliage as a result of a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 128.** Close-up of darkened and curled willow foliage shown in Fig. 127. **Fig. 129.** Acute foliar injury on willow following a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 130.** Acute curling and browning on birch after a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 131.** Dark necrotic tissues on aspen at the points of major contact following a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 132.** Oily sheen and injury on aspen from a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 133.** Progressively more severe injury symptoms on aspen from the light-weight hydrocarbon incident mentioned in Fig. 132. **Fig. 134.** Injury symptoms beginning to develop on poplar 1 hour after a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 135.** Curling, darkening, and oily sheen on alder as a result of a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 136.** Willow foliage after a light spray of heavy-weight hydrocarbons. **Fig. 137.** Aspen trunk lightly coated with heavy-weight hydrocarbons. Note the unaffected green cambium in the abraded area. **Fig. 138.** Aspen bark coated with a mixture of light- and heavy-weight hydrocarbon spray. Note the penetration into the cambium. **Fig. 139.** Discoloration of prickly rose foliage 1 week after a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 140.** Chlorotic and necrotic response of wild sarsaparilla 1 week after a light-weight hydrocarbon spray. **Fig. 141.** Chlorotic and curling symptoms on ground-cover vegetation (mainly grasses and woody shrubs) 1 week after a heavy spray of light-weight hydrocarbons. **Fig. 142.** Dead ground-cover vegetation 1 year after the spraying mentioned in Fig. 141.

aging. However, at concentrations above 25 ppb for 48 hours it can have a deleterious effect on the growth of many agricultural species and is considered an air pollutant. Although ethylene is often present in the atmosphere near large urban areas at levels exceeding 100 ppb, acute injury from ethylene is not very common. Some symptoms have been induced under laboratory conditions, but very little is known about ethylene's effects on vegetation in the field. If natural resource-extraction industries are located in the immediate vicinity of forested areas, ethylene and its analogs may have a marked effect on vegetation growth. Ethylene is known to accelerate the process of aging by reducing growth and by causing chlorosis, necrosis, and possibly abscission of foliage. Symptoms usually appear on the older growth first and develop slowly.

COAL EMISSIONS

The large deposits of coal in western Canada are another important hydrocarbon resource. Even though most of the coal is exported, a considerable amount is burned in the prairie region to power electric generators. The airborne emissions include hydrocarbons, SO_2, fly ash, nitrogen oxides, and trace metals such as arsenic, cadmium, lead, nickel, vanadium, and mercury. Coal dust in the vicinity of mining operations can cause physical injury to foliage by plugging stomata and thereby reducing the gas exchange capacity. The impact on forest vegetation of emission elements such as SO_2 and trace elements is discussed on pages 19-23.

Suggested Reading

Alberta Environment and University of Calgary. 1975. Conference on the environmental effects of oil and salt water spills on land. Banff, Alberta. Nov. 6-7, 1975.

Hindawi, I.J. 1970. Air pollution injury to vegetation. United States Department of Health, Education, and Welfare. National Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71. Pages 32-33.

SALTWATER SPILLS

Saline water is one of the major by-products of the oil and gas industry in western Canada. Millions of barrels of salt water are produced annually by conventional extraction techniques for natural gas and oil, and production is gradually increasing as the older wells are partially depleted of oil and the oil formations are infiltrated by saline water.

The extracted salt water is routinely returned through saltwater disposal wells to the formations from which it was produced, but because of the size and nature of such operations, accidental saltwater and oil spills are unavoidable. Spills occur through pipeline ruptures caused by corrosion, excess pressure, or disturbance and through leakage of pressure control valves.

PHYTOTOXICITY

Sodium chloride (NaCl) is the major component of the oil- and gas-field brine that can cause severe damage to vegetation and soils. The phytotoxicity of NaCl results mainly from elevated levels of chloride in plant tissues. Foliar tissues are such effective accumulators of chloride that the chloride concentration in the leaves may be several times higher than that of the surrounding soil.

Problems associated with saltwater spills on land generally persist much longer than those from oil spills, probably because soil microorganisms can attack and degrade oil, but the salt cannot be broken down.

SYMPTOMS ON CONIFEROUS SPECIES

Unlike sulfur, salts accumulated in plant tissues cannot be adequately assimilated by normal metabolism and therefore result in rapid injury. Discoloration due to salt toxicity develops first on the current and 1-year-old needles. The degree of foliar discoloration (light pink to deep magenta) is related to the

level of chloride accumulated in the tissues. In conifers such symptoms start at the needle tip and progress to the base.

Coniferous trees affected by saltwater spills eventually display reddish brown or magenta crowns (Figs. 143 and 144). These symptoms initially appear near the top of the tree and gradually move downward. The current and 1-year-old spruce needles first become chlorotic, then turn brown (Fig. 145), intensifying to a reddish brown or magenta color (Figs. 144 and 146). If salt levels in the soil become very high, even the older needles that accumulate salts much more slowly become affected.

Salt phytotoxicity symptoms on pine needles are similar to those on spruce (Figs. 147 and 148). If the uptake of chloride is low, the buds may remain unaffected and flush during the next growing season. If high salt levels persist in the soil, however, new foliage will show injury symptoms starting at needle tips (Fig. 149).

Some injury to branch and stem cambium is common after saltwater spills (Fig. 150). Chloride seems to accumulate in the cambium and adjacent tissues, causing disruption in water conduction and eventual tree mortality.

SYMPTOMS ON DECIDUOUS SPECIES

In general, deciduous species respond to salt injury faster than conifers. The first external symptom that develops on birch after salt injury is leaf tip and marginal chlorosis that advances rapidly inward to the central axis (Fig. 151). If the salt toxicity is severe, chlorosis intensifies until the leaves become necrotic (Figs. 152 and 153). In aspen, leaf tips and margins first become slightly chlorotic then turn a dark green color, which produces a water-soaked appearance (Fig. 154). As the toxicity advances, the affected areas become bright yellow (reflecting the zone of salt accumulation) and eventually develop necrosis (Fig. 155) and curling (Fig. 156). Such symptom development is often followed by premature leaf drop. High salt concentrations can also kill buds and cambium, preventing any new growth the following year. Tree mortality from salt toxicity is common in areas of saltwater spills.

Normal fall discoloration of deciduous foliage may be similar to that caused by salt injury. Salt-killed foliage of some deciduous species may remain attached to the branches over the winter period, whereas after normal autumn senescence, leaves form an abscission layer and drop.

OTHER SPECIES

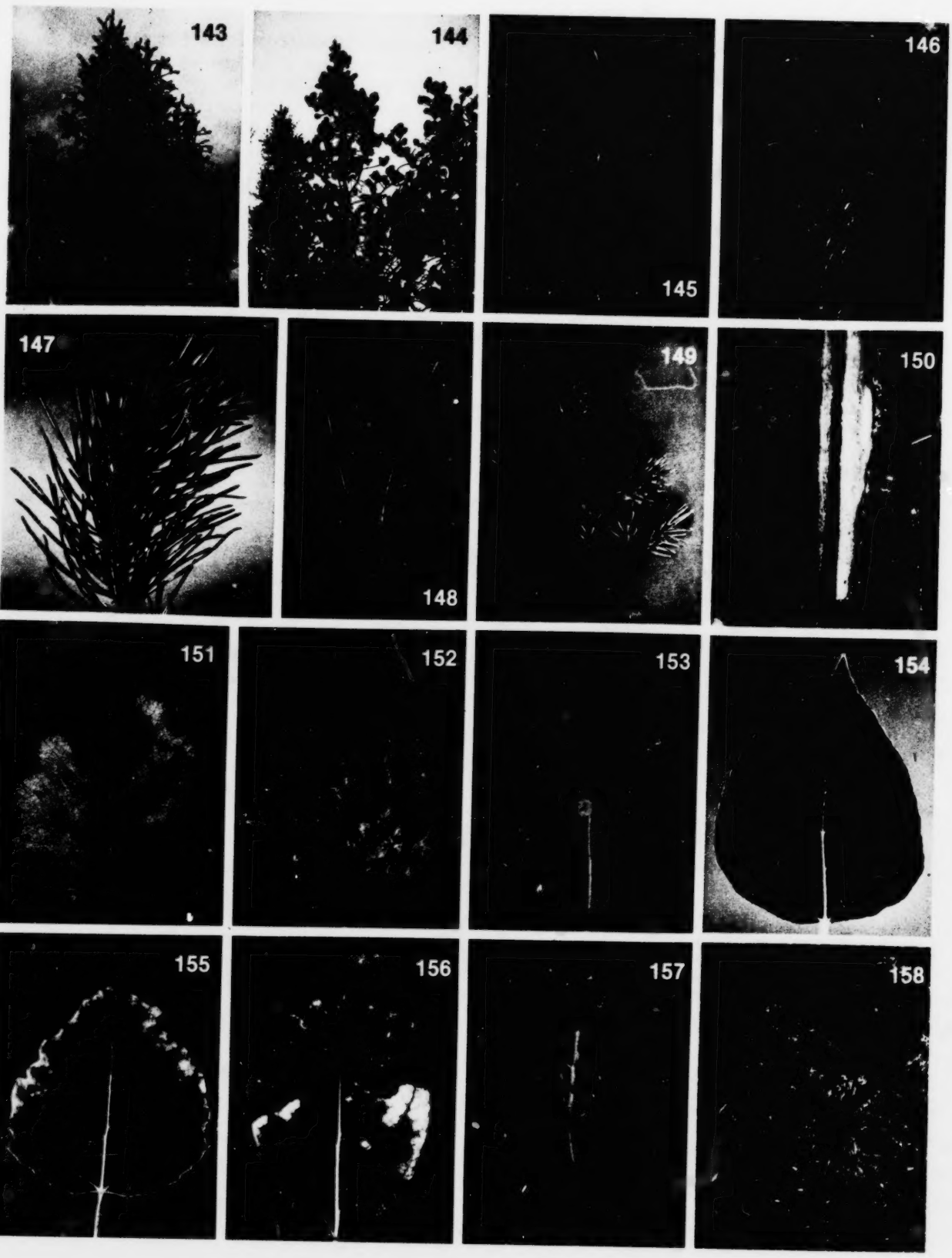
Ground-cover species of higher plants, ground lichens, and bryophytes are also subject to saltwater toxicity and show symptoms similar to those described for deciduous tree species. Severe spills result in brown or reddish brown discoloration of almost all ground-cover species (Figs. 157 and 158).

Because of their location, lichens on tree trunks and branches escape direct salinity effects and thrive quite normally on dead trees. The ground lichens and bryophytes, however, can be severely affected. In fact, the pathway of saltwater movement in a forest can often be delineated by the pattern of affected ground-cover foliage. This is mainly because spills follow downslope movement, and once the chloride ions penetrate the soil they do not disperse laterally to any great extent. This is especially true in clay soils.

Suggested Reading

Alberta Environment and University of Calgary. 1975. Conference on the environmental effects of oil and salt water spills on land. Banff, Alberta. Nov. 6-7, 1975.

Foster, A.C., M.A. Maun, and D.P. Webb. 1978. Effects of road salt on eastern white cedar. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre. Sault Ste. Marie, Ontario. Information Report O-X-277.


143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158

OTHER EMISSIONS

ELEMENTAL SULFUR

In western Canada, sulfur is often present in appreciable quantities in hydrocarbon and mineral resources such as natural gas (except arctic deposits), conventional and oil sands petroleum deposits, coal, and various ore bodies. Western coal is lower in sulfur than the eastern deposits. During the extraction and refining processes sulfur is normally recovered in a molten form that is solidified as elemental sulfur and stored in large blocks.

Drift of sulfur particles from solidifed blocks and sulfur dust produced during the process of loading elemental sulfur into rail cars can adversely affect surrounding vegetation and soils. The sulfur blocks are not subject to dissolution by rain, because elemental sulfur is highly insoluble in water. Sulfur oxidation by bacterial action on the surface of the blocks can yield water-soluble compounds, which are transported to the adjacent areas in runoff water. The pH of such runoff and of nearby water bodies can be highly acidic (pH 2-3) and can have a detrimental effect on vegetation and soil chemistry. The acidic material in transit through the soil may solubilize various elements such as aluminum and magnesium, which in themselves can be phytotoxic.

Normally, vegetation occupying low-lying areas is affected most by acidic runoff. In the boreal forest, this involves black spruce and tamarack stands. Conifers subjected to either elemental sulfur drift or highly acidic water display symptoms of chlorosis (Figs. 159 and 160) and premature defoliation (Fig. 160). These symptoms are similar to those produced by SO_2, as discussed earlier.

Ground-cover species with shallow roots are very susceptible to injury from excess sulfur and high acidity and often show toxicitv symptoms first. A yellow layer of elemental sulfur is often seen in low-lying areas around sulfur piles and can cause severe injury to the ground cover (Fig. 161). Entrapment of elemental sulfur dust and impoundment and treatment of precipitation runoff from sulfur piles may be an effective way to minimize plant injury.

FLARE PITS AND WELL BLOWOUTS

Other important sources of airborne emissions from the oil and gas industry are flare pits and natural gas and oil well blowouts. These emissions may contain a mixture of phytotoxic compounds, usually sulfur gases, hydrocarbons, and saline water. Emissions from well blowouts are released under considerable pressure and can occasionally catch fire, converting hydrogen sulfide to SO_2.

Vegetation injury can range from light (reversible) to severe (irreversible). Light injury may be due to light coating of foliage with hydrocarbons, blowouts without fire, or incidents during the winter when the vegeta-

---

POLLUTANT STRESSES—NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY. Saltwater spill symptoms on forest vegetation (Figs. 143-158).

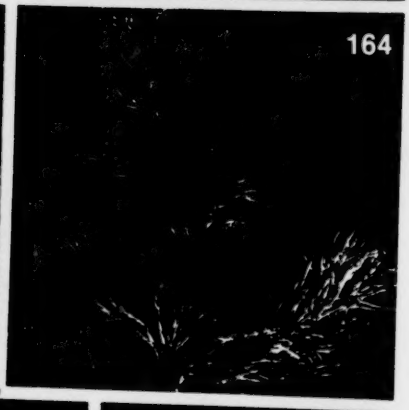
Fig. 143. Reddish brown discoloration of a white spruce crown. **Fig. 144.** Magenta discoloration of dead or dying pine crowns. **Fig. 145.** Brown discoloration of a black spruce branch. **Fig. 146.** Magenta discoloration of current-year black spruce foliage. **Fig. 147.** Magenta discoloration on pine. **Fig. 148.** Close-up of magenta discoloration on pine needles. **Fig. 149.** Magenta discoloration of previous year's black spruce foliage. Current-year growth is starting to show injury symptoms at the needle tips. **Fig. 150.** Death of cambium and sapwood tissues of a pine stem. Note the absence of green cambium under the bark. **Fig. 151.** Initial discoloration pattern on birch. **Fig. 152.** Advanced symptoms on birch. **Fig. 153.** Necrosis on willow. **Fig. 154.** Initial stage of injury on aspen. Note tip and marginal water-soaked appearance. **Fig. 155.** More advanced toxicity symptoms on aspen. Note chlorosis and necrosis that progress toward the central portion of the leaf. **Fig. 156.** Chlorosis followed by necrosis and leaf curling on poplar. **Fig. 157.** Discoloration of Labrador tea. Symptoms move toward the leaf base, indicating the zone of salt accumulation. **Fig. 158.** Dead ground-cover vegetation (mainly grasses and woody shrubs).

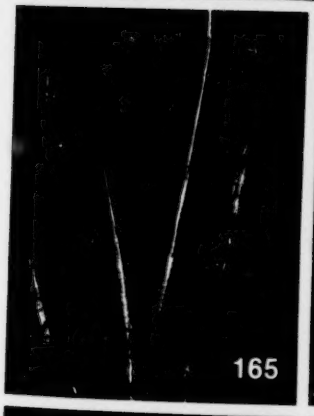
159

160

161

163


164


165

166

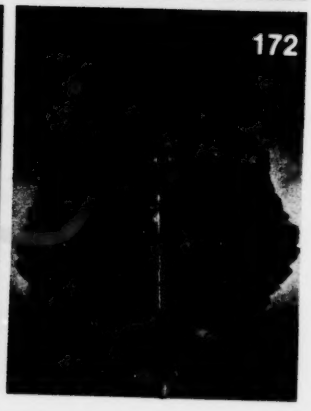
167

168

169

170

171


172

tion is mostly in the dormant stage. Severe injury takes place when emissions occur on a large scale during the active growing season and when blowouts catch fire, converting the less phytotoxic hydrogen sulfide to the more phytotoxic SO_2.

Continuous emissions (SO_2 and incomplete combustion products of hydrocarbons) from flare pits near large oil batteries can cause severe injury to adjacent forest vegetation (Fig. 162). The pattern of such injury is influenced by the direction and speed of prevailing winds. Tree saplings and ground cover are deleteriously affected in areas of heavy impingement by emissions at ground level. The symptoms produced on vegetation (Figs. 163 and 164) are similar to those described earlier for SO_2 (pages 19-23). Branch lichens, the most sensitive indicators of SO_2 pollution, must be examined in these areas because they usually will be the first species to display injury symptoms.

ACID MISTS

Occasionally, sulfur dioxide and nitrogen oxides in the emissions from the oil and gas industry can react with moisture to form acid mist. Hydrochloric acid is also used in oil and gas wells to dissolve some of the limestone formation and sometimes to clean wells. As a result of accidental well blowbacks, hydrochloric acid may be released into the atmosphere as a mist that can injure vegetation and soils. Acids can cause physical injury on the leaf surface or can enter the foliage through the cuticle and stomata, causing dissolution of vital mesophyll and other tissues.

On conifers one of the earliest symptoms developed from exposure to acid mist is chlorotic mottling at the points of contact (Fig. 165). These areas can rapidly turn into brown necrotic tissues (Fig. 166). On deciduous species, mild sulfuric acid mist can cause slight discoloration of the foliar tissues (Figs. 167 and 168). Droplets containing strong acids cause the rapid formation of necrotic spots at points of contact (Figs. 169 and 170). Young foliage appears to be highly sensitive to strong acid mists and becomes desiccated, necrotic, and often distorted (Figs. 171 and 172).

Suggested Reading

Jacobson, J.S. and A.C. Hill (eds.). 1970. Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

United States Department of Agriculture. 1973. Air pollution damages trees. Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.

POLLUTANT STRESSES–NATURAL GAS AND OIL INDUSTRY. Other emission (elemental sulfur, flare pit, well blowout, and acid mist) symptoms on forest vegetation (Figs. 159-172).

Elemental sulfur: Fig. 159. Chlorotic symptoms on black spruce as a result of highly acidic runoff water from sulfur piles. **Fig. 160.** Severe yellowing of young white spruce foliage and initiation of premature defoliation. **Fig. 161.** Ground-cover vegetation (mainly grasses and woody shrubs) killed by highly acidic runoff water from sulfur piles. **Flare pit and well blowout: Fig. 162.** Conifers killed by sulfur and other gases emitted from the flare pit in the foreground. **Fig. 163.** White spruce seedling foliar injury caused by emissions from a well blowout that caught fire. **Fig. 164.** Pine seedling killed by emissions from a well blowout that caught fire. **Acid mist: Fig. 165.** Discoloration of pine needles caused by hydrochloric acid droplets. Note localized injury at the point of contact. **Fig. 166.** Hydrochloric acid mist symptoms on white spruce. **Fig. 167.** Light bleaching of aspen caused by a mild sulfuric acid mist. **Fig. 168.** Light discoloration on aspen showing the sulfuric acid spray pattern. **Fig. 169.** Hydrochloric acid injury on poplar at the point of contact. **Fig. 170.** Close-up of hydrochloric acid injury on poplar at the point of contact. **Fig. 171.** Curling of new birch foliage as a result of exposure to a mild hydrochloric acid spray. **Fig. 172.** Close-up of hydrochloric acid discoloration on birch. The leaf had curled but was straightened to show the injury.

METAL MINING AND SMELTING INDUSTRY

The continued expansion of the base metal mining and smelting industry carries considerable potential for emissions that can damage northern forest ecosystems. Because the nickel-copper-zinc ore bodies in western Canada occur naturally as sulfides, the smelting and other metallurgical processes employed release into the environment considerable quantities of SO_2, trace elements such as zinc, copper, nickel, lead, arsenic, mercury, and cadmium, and other particulate matter.

Heavy-metal particulates can cause injury to vegetation by forming a film of particulate matter on foliar surfaces or by becoming embedded in the cuticle and stomata. This embedded material, which is difficult to remove by washing, can interfere with gas exchange processes, light availability, rate of photosynthesis, and transpiration. Additionally, heavy metals in aerosol form can be absorbed by the foliage.

Smelter emission injury to vegetation is generally quite different from injury attributed to SO_2 alone. In areas close to the source, metal pollutants produce lesions or mottling on needle surfaces. The injury is more prominent on the side facing the emission source.

The combined effects of some heavy metals and SO_2 on vegetation and soil chemistry may be additive or synergistic. In soils the acidity contributed by SO_2 can solubilize many heavy metals that are normally chelated in the soil surface organic matter and thus make them more readily available to uptake by vegetation and the subsequent blockage of key metabolic processes.

Sulfur is normally cycled within the forest ecosystem, and incoming pollutant sulfur can also be cycled. Heavy metals, however, are cumulative because they are nonbiodegradable. Although some metals are essential in trace amounts, small excesses can be poisonous.

Soil made sterile through the addition of excess sulfur can be rendered productive with reasonable economy by chemical treatment such as liming. Areas exposed to uncontrolled smelter emissions for any length of time soon become devoid of vegetation and difficult to reclaim. Liming can decrease heavy metal toxicity of soils by reducing metal availability to plants.

PHYTOTOXICITY

The effects on forest vegetation of emissions containing SO_2 and heavy metals from smelters may be immediate and acute or long term and chronic, depending on the concentration and kind of pollutant. Forest species can respond to SO_2, heavy metals, and other emissions at the individual or population levels. Effects at the individual level, the more common, result from comparatively low concentrations, and effects at the population level are brought about by highly toxic levels of emissions.

Species respond differently to increased levels of smelter emissions and in their ability to develop a tolerance. Revegetation of areas contaminated by heavy metals generally depends upon the evolution of tolerant species. Tolerance may be due to the ability of species to avoid metals in the environment or to true resistance in their metabolic processes.

SYMPTOMS ON VEGETATION WITHIN A SPRUCE COMMUNITY

In general, low concentrations of smelter emissions reduce growth and yield without producing any visible symptoms of injury for several years. High concentrations of smelter emissions, even on an intermittent basis, can cause visible injury to vegetation

(Fig. 173). At first the injury is spotty and may not be readily identifiable from the air. Crowns of conifer trees in an area showing partial forest decline display chlorosis (Fig. 174), then premature needle drop. If an area is frequently fumigated by high concentrations of smelter emissions, symptoms of acute injury such as chlorosis, necrosis, and premature needle drop may result throughout the impingement zone (Fig. 175). When exposed to toxic levels of smelter emissions over many years, an area may become completely denuded (Fig. 176). Toxic levels of heavy metals and SO_2 caused acidity in the soils have rendered impossible or uneconomical the reestablishment of forest species around Sudbury, Ontario.

In spruce, the older foliage is always the first to show symptoms of smelter emission toxicity. However, if the lower branches are protected by snow cover during the winter, then the upper branches will bear more severe symptoms of toxicity (Fig. 177) because they are directly exposed to emissions throughout the year. On older needles, chlorosis and necrosis develop first at the tip, then gradually progress to the needle base (Figs. 178 and 179). Young needles, because of their higher rate of metabolic activity, can assimilate more SO_2 into their metabolism than the older ones before showing symptoms of toxicity. Where severe fumigations have occurred, young seedlings become as chlorotic as the older ones and eventually die (Fig. 180).

Black spruce is generally more resistant to smelter emissions than white spruce but displays general chlorosis and defoliation when exposed to toxic concentrations for an extended period (Fig. 181). The side of the tree exposed to the prevailing winds exhibits the maximum air pollutant injury (Fig. 182), with chlorotic symptoms appearing first on the older needles on the exposed side (Fig. 183). As these symptoms intensify, progressive necrosis starts at the needle tip (Figs. 185 and 186). Needles drop prematurely, and even younger needles display symptoms (Fig. 184). In areas where heavy metal contamination has moved into the mineral soil or root zones, premature needle drop and toxicity symptoms are common even on current-year growth (Fig. 187). The current-year growth becomes stunted and chlorotic before it drops.

Epiphytic lichens are capable of taking up sulfur from SO_2 and large amounts of trace elements. In areas subjected to frequent smelter emissions, these pollutants can virtually wipe out epiphytic lichen populations, leaving only remnants (Fig. 188).

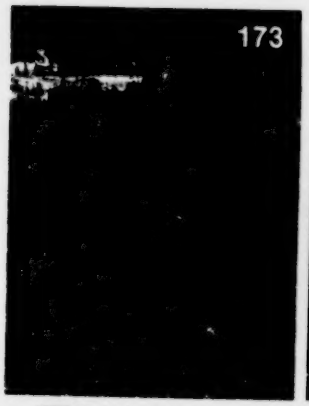
SYMPTOMS ON VEGETATION WITHIN A PINE COMMUNITY

Lodgepole and jack pines are more sensitive to smelter fumigations than either white or black spruce. Crown deterioration in pine forests is quite common in areas frequently exposed to smelter emissions, although individual trees vary in sensitivity to smelter emissions (Fig. 189). If severe fumigations continue over a considerable length of time, pine will display acute injury symptoms (Fig. 190), with needle tips showing the first necrotic symptoms (Figs. 191 and 192). As on spruce, necrotic symptoms gradually spread to the base of the needle before it drops prematurely. Necrosis is mostly attributable to the extent of SO_2 fumigation.

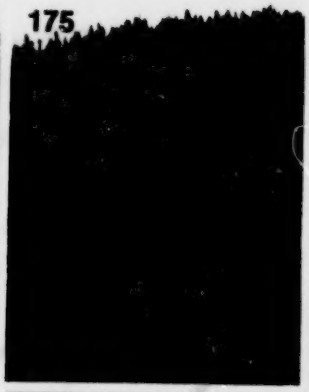
If the fumigations are not severe enough to kill the buds, the trees will flush the following spring; but the older needles, because of high sensitivity to smelter emissions or because they have been fumigated for a longer time, may show severe discoloration and eventually drop off (Figs. 193 and 194). Some needles may show bands of irregular discoloration due to the combined effects of SO_2 and heavy metals (Fig. 195).

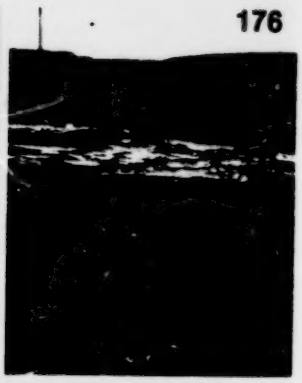
If the fumigations continue after spring bud break, new growth is stunted, chlorotic, and necrotic. Uneven growth of pine needles is frequently observed in the air pollution impingement areas around smelters and is caused by intense exposures at different stages of needle development. On vegetation close to the source, smelter emissions produce lesions or mottling on needles (Figs. 196-198).

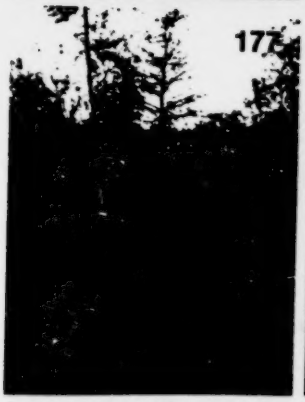
Lichens inhabiting the branches and trunks of pine trees near smelter emissions are


173

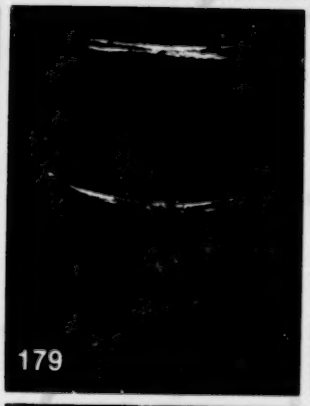
174

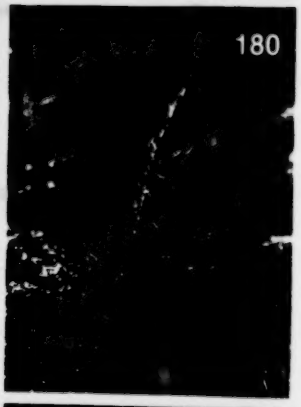

175


176

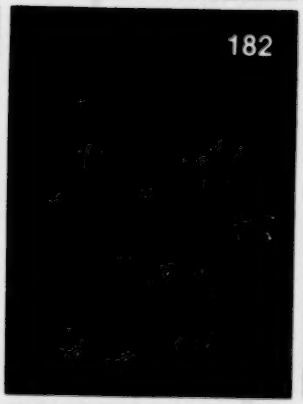

177

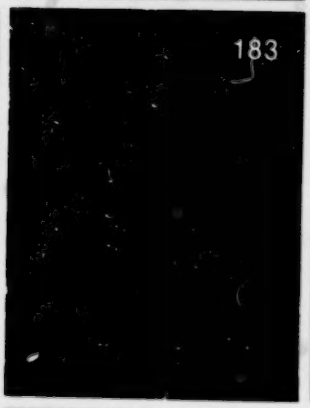
178


179


180

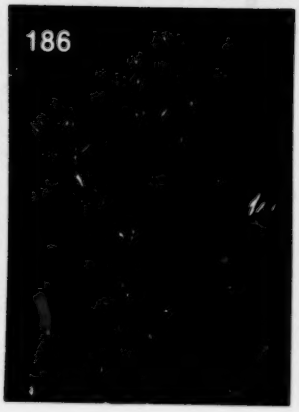
181


182


183

184

185


186

188

subject to severe degradation (Fig. 201). Because of their direct exposure to aerial emissions, they are much more sensitive to air pollutants than are the ground lichens.

Soils heavily contaminated by smelter emissions also provide a hostile environment for plant growth. The fairly long root network of a healthy pine seedling is shown in Fig. 202. In contaminated soils, seedlings invariably have stunted root systems with few or no secondary roots (Figs. 203 and 204). This is especially true of shallow-rooted species that are in direct contact with emission elements in the upper layers of contaminated soil. Poor root development brought about by trace element toxicity in such soils prevents any regeneration of forest species.

FLUORIDE EMISSIONS

In forest areas exposed to high levels (acute concentrations) of fluoride emissions (from aluminum smelters and the phosphorus and fertilizer industry), pine needles may exhibit spectacular tip burn that rapidly extends toward the needle base (Figs. 199 and 200). This injury appears first on young tissues or current-year needles as chlorosis at the tip that later turns reddish brown. The older conifer needles are comparatively resistant to fluoride injury. Occasionally, bands of severe discoloration may appear at irregular intervals (Fig. 200). Low levels (chronic concentrations) of fluoride emissions, on the other hand, have been shown to cause a reduction in retention of 2-year-old needles on black and white spruce.

SYMPTOMS ON VEGETATION WITHIN A DECIDUOUS COMMUNITY

In general, the foliage of deciduous species such as birch, aspen, and poplar shows symptoms of smelter emission injury much more readily than coniferous species. Deciduous species are not as susceptible to severe injury, however, because the foliar retention, or exposure time, is only 4-6 months compared to 4-6 years for conifers.

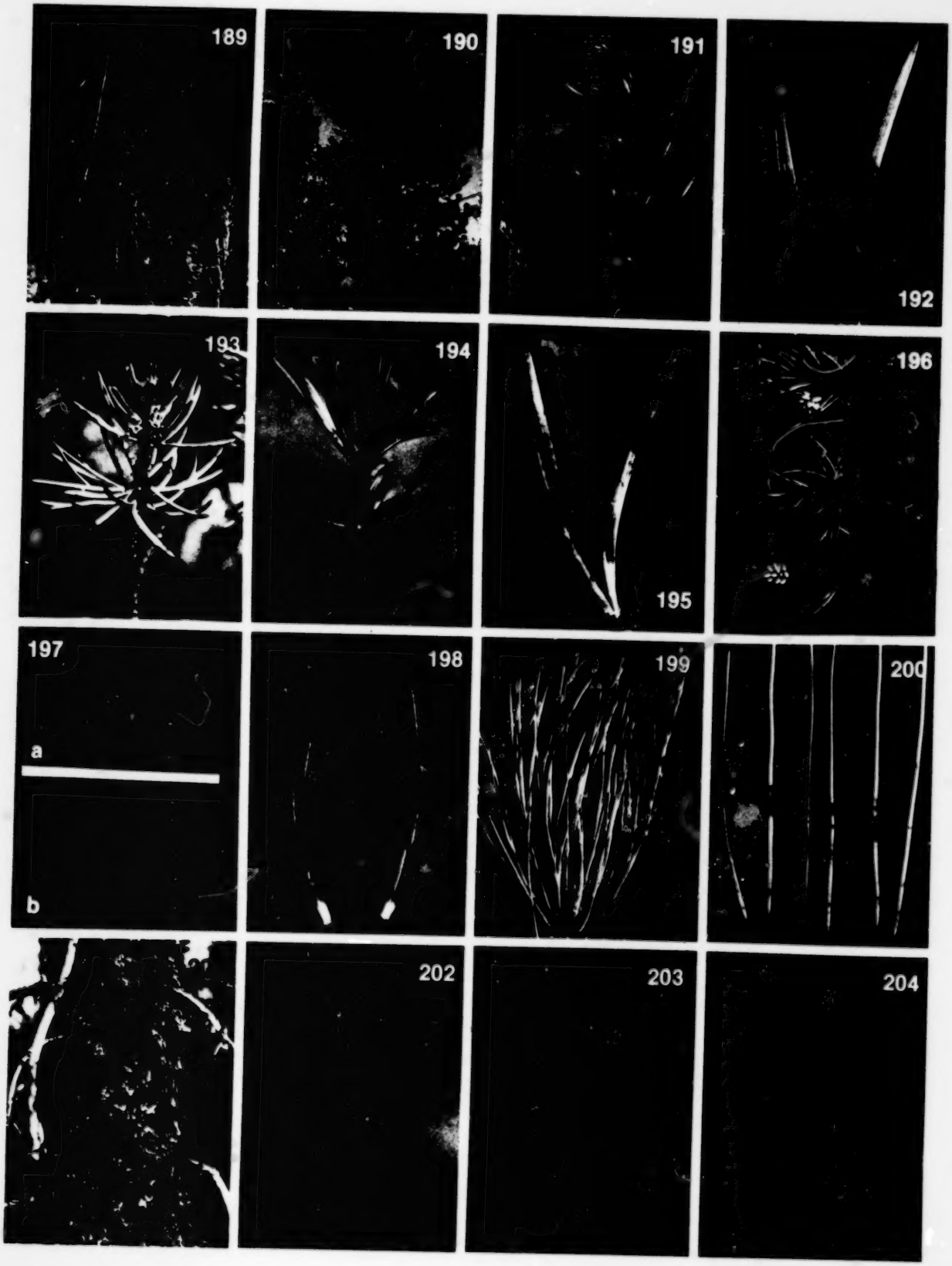
Birch is generally the most sensitive deciduous species. Moderately high concentrations of smelter emissions invariably cause acute injury, which appears as severe foliar discoloration (Fig. 205). Advanced injury symptoms are generally preceded by interveinal and marginal wet appearance and mild chlorosis. After multiple fumigations, the foliage turns necrotic and then falls prematurely (Fig. 206). The necrotic symptoms on such foliage are shown in Fig. 207.

Aspen foliage responds to smelter emissions initially by developing interveinal chlorosis (Fig. 208). After repeated exposures this is followed by tissue necrosis (Figs. 209 and 210). Poplar behaves similarly to birch and aspen (Figs. 211 and 212). As a result of necrotic injury, leaves become very dry and

---

POLLUTANT STRESSES—METAL MINING AND SMELTING INDUSTRY. Nickel-copper-zinc smelter emission symptoms on vegetation within a spruce community (Figs. 173-188).

Fig. 173. General forest decline. **Fig. 174.** Partial decline of a forest stand due to gaseous (SO_2) and heavy metal emissions. **Fig. 175.** Severe decline of a forest stand as a result of acute fumigations with SO_2 and exposure to heavy metal particulates. **Fig. 176.** Denuded forest and ground-cover vegetation in the immediate vicinity of a metal smelter. **Fig. 177.** Severe defoliation of the upper branches and discoloration of the lower branches of a white spruce. **Fig. 178.** Severe discoloration of white spruce needle tips. **Fig. 179.** White spruce needle injury. Symptoms start at the needle tip and progress toward the base. **Fig. 180.** Total necrosis of a white spruce seedling grown in a highly contaminated area. **Fig. 181.** Severe discoloration of a black spruce crown. **Fig. 182.** Severe injury on the side of a black spruce crown facing the smelter. **Fig. 183.** Discoloration of older foliage on black spruce indicates first injury symptoms. **Fig. 184.** Intensification of symptoms on older foliage of black spruce and premature needle drop. **Fig. 185.** Initiation of needle tip necrosis on black spruce as a result of acute concentrations of smelter emissions. **Fig. 186.** Intensification of necrotic symptoms on black spruce and premature drop of older needles. **Fig. 187.** Needle loss and severely injured current-year needles on black spruce indicate probable soil contamination. **Fig. 188.** Dead or severely degraded tree lichens in an area heavily impinged by smelter emissions.


189
190
191
192
193
194
195
196
197
a
b
198
199
200
202
203
204

brittle before being shed. Since air pollutants such as SO_2 and heavy metals do not initiate the formation of an abscission layer, even the dried, necrotic leaves remain attached to the branches for a considerable length of time before they drop. Because of their protective scales, buds remain unaffected by an occasional moderately severe fumigation incident or several mild ones and will flush during the next growing season. A single acute fumigation during the spring bud break will affect only the fully emerged leaves; there is no appreciable effect on the foliage that subsequently flushes (Fig. 211).

Symptoms of chlorosis and necrosis produced on willow leaves tend to be irregular in pattern (Fig. 213). Willow, however, is not as sensitive to smelter emissions as birch, aspen, poplar, and alder. Alder produces marginal and interveinal discoloration in response to smelter emissions (Fig. 214).

Because of their shallow roots and direct contact with accumulated toxic elements in the top organic layer, ground-cover species of higher plants are either killed or affected deleteriously by smelter emissions over extended periods of time. Labrador tea, one of the more sensitive ground-cover species, develops necrotic areas on the foliage tips in response to smelter emissions (Fig. 215). Necrosis eventually extends to the stem. The development of these symptoms on the current-year foliage is preceded by premature drop of the previous year's leaves (Fig. 216).

FLUORIDE EMISSIONS

Fluoride emissions from aluminum smelters and fertilizer plants cause a variety of symptoms on deciduous species. The most common pattern is a light green, water-soaked appearance followed by tip and marginal leaf necrosis that eventually spreads to the whole leaf. When fluoride concentration in plant tissues accumulates beyond a certain critical level, it can cause mottling or necrotic banding at the point of accumulation.

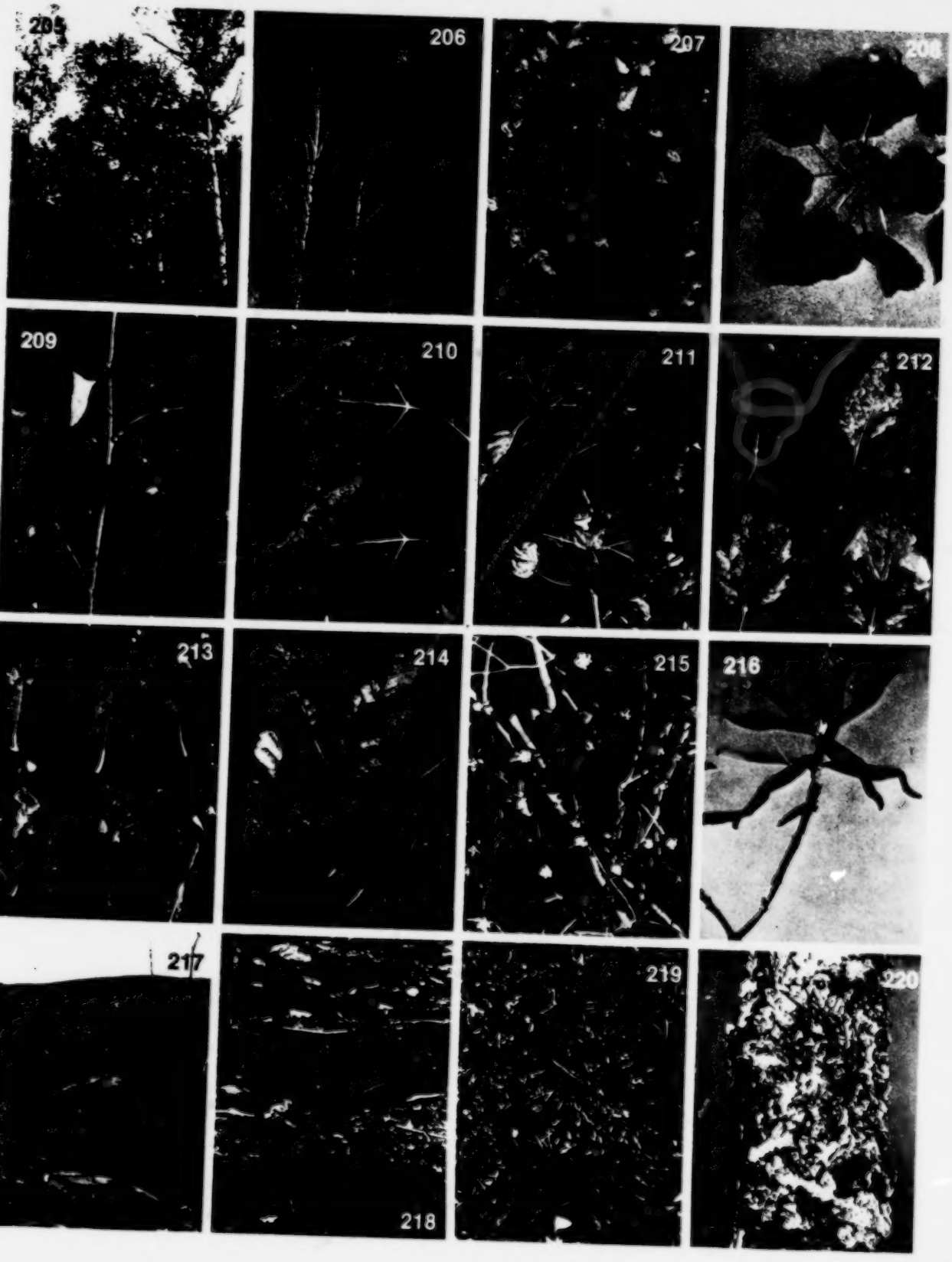
BRYOPHYTES AND LICHENS

Bryophytes and lichens are effective indicators of smelter pollution. In heavily impinged areas, rock outcrops that are normally inhabited by lichens become denuded (Fig. 217). Similarly, soils that were once rich with lichens and bryophytes become bare

---

POLLUTANT STRESSES—METAL MINING AND SMELTING INDUSTRY. Nickel-copper-zinc smelter emission symptoms on vegetation within a pine community (Figs. 189-198 and 201-204). Figs. 199 and 200 show fluoride emission (aluminum smelter) symptoms. Seedlings in Figs. 202-204 were grown under greenhouse conditions using uncontaminated and heavy-metal-contaminated soil obtained from field locations.

Fig. 189. Pine crowns under stress. Note the differences in sensitivity of various trees. **Fig. 190.** Acute SO_2 fumigation injury on pine. **Fig. 191.** Acute SO_2 fumigation symptoms on pine needles showing necrosis developing from the tip back. **Fig. 192.** Close-up of acute SO_2 injury on pine needles. **Fig. 193.** Chlorotic injury on pine as a result of frequent exposures to smelter emissions. **Fig. 194.** Irregular pollutant symptoms on a pine seedling as reflected in uneven needle growth. **Fig. 195.** Close-up of pine needles showing bands of different degrees of discoloration. **Fig. 196.** Varying degrees of pine needle response. The pine branch with the least number of needles was from an area close to the smelter and the one with the most needles was from a more distant site. The lesions were caused by heavy metal injury. **Fig. 197.** Directional mottling response on pine needles facing (a) toward the stack and (b) away from the stack. **Fig. 198.** Close-up of mottled pine needles illustrated in Fig. 197(a). **Fig. 199.** Symptoms of fluoride (aluminum smelter) injury on pine foliage. Note severe discoloration of needle tips. **Fig. 200.** Symptoms of fluoride (aluminum smelter) injury on pine needles. Early stages of symptom development occurs on the needle tips (Fig. 199). The banding symptoms shown here indicate more severe injury. **Fig. 201.** Tree lichens on a pine tree showing degradation and depletion. **Fig. 202.** Healthy pine seedling with a full network of roots. **Fig. 203.** Injured pine seedling grown in heavy-metal-contaminated soil showing stunted roots and little lateral root development. **Fig. 204.** Dead pine seedling that had been grown in heavy-metal-contaminated soil. Note lack of root elongation and lateral root development.


205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220

when subjected to long-term smelter emissions (Figs. 218 and 219). Such soils often become unfit to support most vegetation.

Sensitive lichen species inhabiting tree trunks and branches become severely degraded (Fig. 220) and depleted after long exposure to smelter emissions, even at low concentrations.

Suggested Reading

Foy, C.D., R.L. Chaney, and M.C. White. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Annual Review of Plant Physiology 29:511-566.

Hutchinson, T.C. (ed.). 1975. International conference on heavy metals in the environment—symposium proceedings. Volume II. Toronto, Ontario. Oct. 21-31, 1975. Institute for Environmental Studies, University of Toronto. Toronto, Ontario.

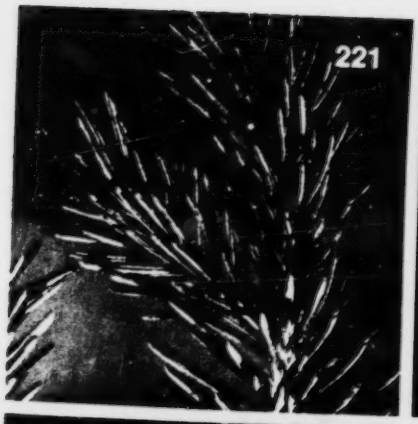
Jacobson, J.S. and A.C. Hill (eds.). 1970. Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

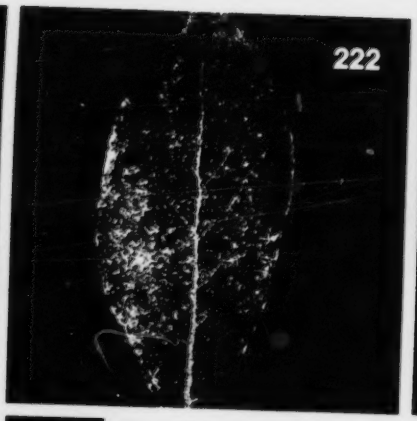
Sidhu, S.S. 1978. Patterns of fluoride accumulation in forest species as related to symptoms and defoliation. Proceedings of the 71st annual meeting of the Air Pollution Control Association, Houston, Texas. Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Paper 78-24.7

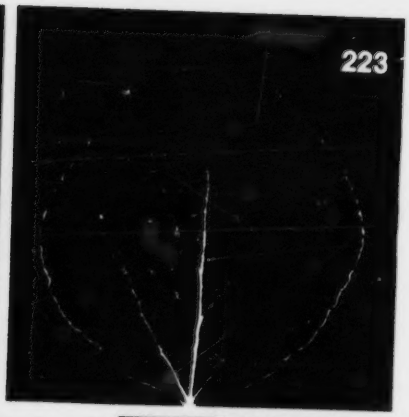
Treshow, M. 1971. Fluorides as air pollutants affecting plants. Annual Review of Phytopathology 9:21-44.

POLLUTANT STRESSES—METAL MINING AND SMELTING INDUSTRY. Nickel-copper-zinc smelter emission symptoms on vegetation within a deciduous community (Figs. 205-220).

Fig. 205. Acute symptoms on birch foliage. **Fig. 206.** Partial defoliation of birch due to successive emission exposures. **Fig. 207.** Interveinal and marginal leaf chlorosis and necrosis on birch. **Fig. 208.** Interveinal chlorosis on aspen leaves 1 day after exposure to smelter emissions. **Fig. 209.** Interveinal and marginal necrosis on aspen after exposure to high concentrations of smelter emissions. **Fig. 210.** Close-up of interveinal necrosis on aspen. **Fig. 211.** Symptoms on poplar foliage after a single acute exposure to emissions during bud break. Note the lack of symptoms on leaves that emerged after the incident. **Fig. 212.** Progression of symptoms on poplar. Note irregular pattern of symptom development. **Fig. 213.** General necrotic symptoms on willow. **Fig. 214.** Interveinal and marginal discoloration on alder. **Fig. 215.** Necrosis on Labrador tea leaf tips. **Fig. 216.** Current-year foliar injury and loss of 1-year-old leaves on Labrador tea. **Fig. 217.** Denuded rocks and completely depleted lichens. **Fig. 218.** Complete depletion of mosses in an area severely impinged by smelter emissions. **Fig. 219.** Lack of ground-cover vegetation as a result of severe contamination. Note dead needles fallen from affected trees. **Fig. 220.** Severely degraded tree lichens.


221


222


223

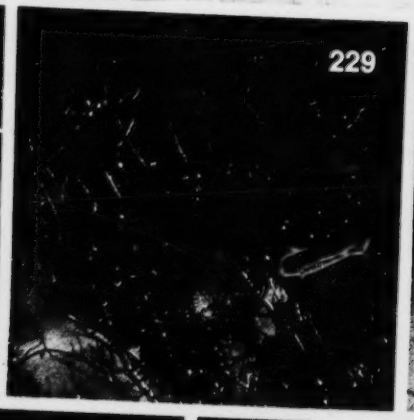
224

225

226

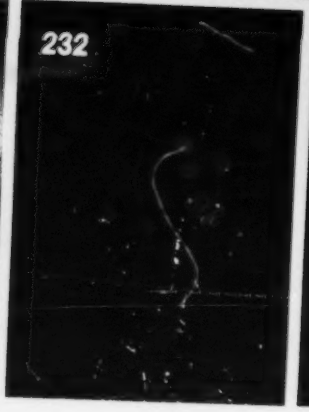
227

228


229

230

231


232

233

234

OTHER MINERAL INDUSTRIES

Aerial emissions from cement production, potash mining and refining, and stockpiling of calcareous and siliceous materials contain particulates that can have a detrimental effect on vegetation and soils.

CEMENT INDUSTRY

Portland cement production involves quarrying of limestone, feldspar, shale, and clay. These materials are then crushed, screened, mixed with gypsum, and processed to form cement. The principal emission during processing is cement dust released from kilns; the dust contains calcium, potassium, and sodium oxides and smaller amounts of magnesium, manganese, and sulfur. Calcium oxide is the largest constituent. Because of the large volumes of parent materials used in the kilns, extremely efficient electrostatic precipitators are required to reduce particulate emissions.

Cement dust can affect vegetation directly, indirectly through soil contamination, or both ways. Very fine dust particles can coat foliar surfaces (Figs. 221-223), thereby plugging stomata and reducing transpiration and gas exchange capability. Growth is impaired, mainly because of the reduction in photosynthetic activity. Long exposures of foliage to cement dust can cause premature foliar drop. Frequent rains, however, reduce such direct effects by washing off at least some of the deposited dust (Fig. 223).

Cement dust may also injure the higher-plant understory and lichens and bryophytes. The reduced number of ground-cover species and depauperate ground and tree lichens in such areas are probably due to the effects of cement dust.

Cement dust indirectly affects vegetation by influencing soil chemistry. Because the dust is alkaline, it can shift soil pH toward the basic side. This encourages the growth of calciphile species and limits others, such as conifers, that grow better in acidic soils. Large trees, because of their deeper root systems, are not affected as severely as the young, shallow-rooted species. In calcareous soils, cement dust has little or no effect, and consequently there is no shift in the vegetation species that normally grow there.

Suggested Reading

Treshow, M. 1970. Environment and plant response. McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario. Pages 369-373 (dusts).

POLLUTANT STRESSES—OTHER MINERAL INDUSTRIES. Cement dust, salts, and calcareous material emission symptoms on forest species (Figs. 221-234).

Cement dust: Fig. 221. Coating of white spruce needles. **Fig. 222.** Heavily coated willow leaf. **Fig. 223.** Coated aspen leaf with dust partially washed off by rains. **Salts from the potash industry: Fig. 224.** Deposition of sodium and potassium salts on soil surface. **Fig. 225.** Chlorotic and necrotic symptoms on willow. **Fig. 226.** Interveinal and marginal chlorosis of Manitoba maple foliage. **Fig. 227.** Marginal necrosis on aspen. **Fig. 228.** Close-up of marginal necrosis on aspen. **Fig. 229.** Branch tip dieback and proliferation of lateral buds on aspen. **Fig. 230.** Close-up of lateral bud proliferation on aspen caused by dieback of branch tips. **Drift from storage piles of calcareous materials: Fig. 231.** Forest stand mortality caused by a heavy coating of gypsum. **Fig. 232.** Death of a white spruce as a result of gypsum dust coating foliage and stems. **Fig. 233.** Main stem of a tree coated with calcareous material. **Fig. 234.** Dead white spruce needles resulting from the deposition of gypsum dust.

POTASH INDUSTRY

The potash mining and refining industry in Saskatchewan produces large quantities of aerial emissions containing mostly potassium and sodium chlorides in the ratio of 3:1. Aerial emissions take the form of salt particles that originate from the drying stacks during the refining process. A visible layer of white potassium and sodium salts sometimes accumulates on soil surfaces (Fig. 224) around processing plants. In general, such areas support little or no vegetation. Saltwater sprays are also quite common from such operations.

Phytotoxicity is believed to be due mainly to an excess of chloride, sodium, and potassium ions. Generally, deciduous species appear to be more sensitive to chloride salts than conifers, as pointed out on page 31. This is probably because deciduous species accumulate toxic levels of these salts in their tissues at a faster rate than conifers. The following table, based on field observations and elemental analyses on vegetation samples from central Saskatchewan, shows relative sensitivities to salt emissions of the predominant species.

Table 2. Species sensitivity to salt emissions from the potash industry

Species	Sensitivity
Manitoba maple	High
Poplar	High
Caragana	High
Willow	Medium
Elm (American)	Medium
Scots pine	Low
Colorado blue spruce	Low

Injury symptoms directly attributed to salt emissions include interveinal and marginal chlorosis (Figs. 225 and 226). At a high level of salt accumulation these symptoms are followed by the development of marginal necrotic tissues (Figs. 225, 227, and 228) and premature leaf drop (Fig. 229). The dieback of branch tips (Fig. 229) results in proliferation of lateral buds and formation of broom-like structures (Figs. 229 and 230).

STORAGE PILES OF CALCAREOUS MATERIALS

Certain industrial operations require storage piles of calcareous, siliceous, and other materials, generally in the form of particulate matter or powder. When blown or washed away into forested areas in large enough quantities, these materials can cause severe phytotoxicity. A common example is gypsum dust that has drifted from storage piles. The vegetation injury observed in such areas is mostly due to coating of leaf surfaces with gypsum or other such materials. Coating of leaf surfaces and plugging of stomata can retard growth and eventually kill vegetation (Figs. 231 and 232). Tree stems and foliage noticeably coated with calcareous or other such materials in the vicinity of storage piles (Figs. 233 and 234) leave no doubt as to the cause of vegetation decline.

PULP AND PAPER INDUSTRY

The chemical conversion of wood chips into cellulose fibers and the refining and drying required to make paper results in a wide range of aerial emissions, which vary according to the process used for pulping. Two wood digestion methods are normally employed: the acid sulfite process and the kraft, or alkaline, process. The major emission from the acid sulfite process is SO_2. The kraft process releases appreciable amounts of hydrogen sulfide (H_2S), methyl mercaptan, and dimethyl sulfide as well as limited amounts of SO_2, sodium hydroxide, and ammonia; it therefore can cause a more serious air pollution problem in the surrounding areas than the acid sulfite process. Emissions may contain some or all of these substances and various products of their interactions; for example, ammonium salts and sodium hydroxide can interact to form blue plume, or smoke. In western Canada, the kraft process is most commonly used for producing paper because of its suitability for coniferous trees of the boreal forest.

SYMPTOMS ON LICHENS

The vegetative response to pulp mill emissions varies according to the composition of emissions and the vegetation types. When tree lichens are exposed to pulp mill emissions they exhibit symptoms of degradation similar to those caused by natural deterioration. The three major types of tree lichens are foliose (leaflike) (Figs. 235 and 237), fruticose (branchlike) (Figs. 238 and 239), and crustose (crustlike). Because of their large surface area and consequently high pollutant uptake, fruticose lichens are more sensitive to industrial airborne emissions than foliose or crustose lichens.

An example of a healthy foliose lichen (*Hypogymnia* species) is shown in the upper part of Fig. 235. Partially and fully degraded lichens (*Parmelia* species) (Figs. 236 and 237) occur as a result of exposure to pulp mill emissions containing H_2S and SO_2. A pinkish discoloration (Fig. 237) occurs during the advanced stage of degradation.

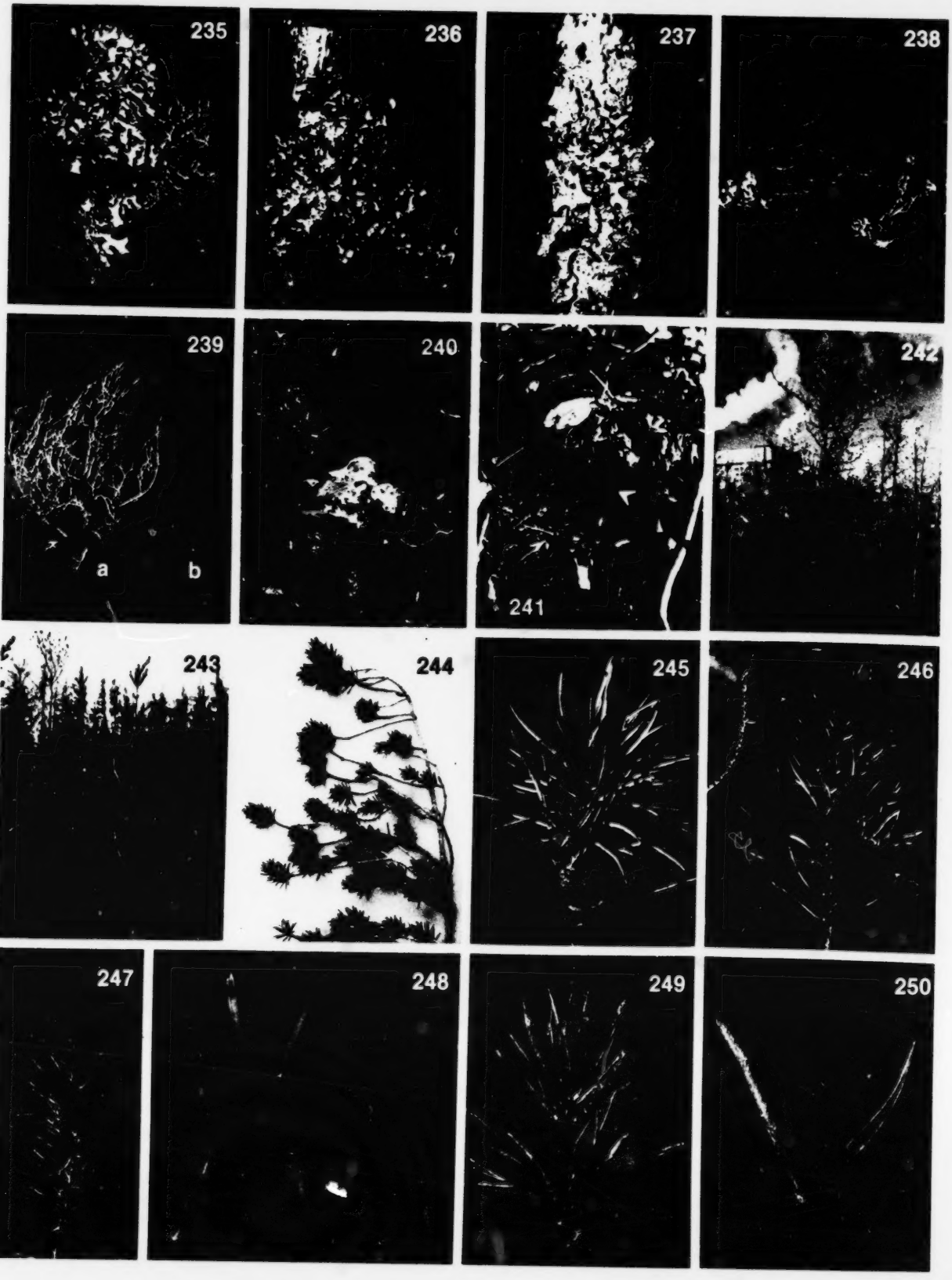
After continuous exposure of fruticose lichens such as *Usnea* species to pulp mill emissions containing sulfur gases, the network of highly functional fine branches (Fig. 239a) becomes severely degraded (Fig. 239b). At this stage, the lichens become discolored and appear compacted (Figs. 238 and 239b); the green color in Figs. 238 and 239b is due to algae growth on air-pollutant-damaged tissues. When severely degraded, lichens lose their structural strength and ability to cling to trees; only a few remnants may be seen (Figs. 188 and 201).

Normal ground lichens such as the leaflike *Peltigera* species turn chlorotic when exposed to pulp mill emissions (Fig. 240). They become brown or necrotic and disintegrate (Fig. 241) after continuous exposure. In general, depauperate ground and tree lichens are found in heavily polluted areas.

SYMPTOMS ON CONIFEROUS SPECIES

Most pulp mills in the boreal region are located near spruce-pine forests; pine is used here to exemplify symptoms produced by all conifers in response to pulp mill emissions.

Pine trees subjected to pulp mill emissions over extended periods of time often display a sparse crown (Fig. 242). Foliage becomes chlorotic (Fig. 243), needle growth is stunted, and needles drop prematurely (Figs. 244 and 245). In heavily fumigated areas, acute injury symptoms (Fig. 245) appear on needles of all ages that remain on the trees and are more intense on older needles (Fig. 246). The most common symptom of consistent and moderately heavy exposures to emissions containing sulfur gases is the development of chlorosis that gradually progresses from the needle tip to the base


235
236
237
238
239
a
b
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250

(Fig. 246). Such foliar symptoms are more intense on older needles than on younger ones (Fig. 247). Since pulp mill emissions contain sulfur gases plus several other pollutants, chlorotic bands occasionally are produced (Fig. 248). Sometimes sprays of alkaline materials in the emissions are deposited as residues on the needle surfaces, resulting in some discoloration at the point of contact (Figs. 249 and 250). It is common for pulp mill emissions to kill trees, especially in areas often exposed to emissions during the active growing season.

Suggested Reading

Carlson, C.E. 1974. Sulphur damage to Douglas-fir near a pulp and paper mill in western Montana. United States Department of Agriculture. Forest Service, Northern Region. Division of State and Private Forestry. Missoula, Montana. Report 74-13.

POLLUTANT STRESSES—PULP AND PAPER INDUSTRY. Emission symptoms on forest vegetation (Figs. 235-250).

Fig. 235. Normal appearance of foliose tree lichens (mostly *Hypogymnia* sp.). **Fig. 236.** Partially degraded foliose tree lichens (mostly *Parmelia* sp.). **Fig. 237.** Fully degraded foliose tree lichens (mostly *Parmelia* sp.). Note the slightly pink coloration, an indication of lichen degradation. **Fig. 238.** Degraded fruticose tree lichens (*Usnea* sp.). **Fig. 239.** Examples of **(a)** normal and **(b)** degraded fruticose tree lichens (*Usnea* sp.). **Fig. 240.** *Peltigera aphthosa*, a leaf-like ground lichen, displaying chlorotic symptoms. **Fig. 241.** Shriveled, brown, necrotic remnants of the ground lichen *Peltigera aphthosa*. **Fig. 242.** Partially defoliated pine crowns. **Fig. 243.** Severe chlorosis and necrosis of pine needles. **Fig. 244.** Lack of pine needle growth and retention. **Fig. 245.** Acute injury on pine. Note specks of emission residue on needles. **Fig. 246.** Chlorosis and necrosis on pine progressing from needle tip to needle base. **Fig. 247.** Necrosis of 1-year-old pine needles, with current-year needles relatively unaffected. **Fig. 248.** One-year-old pine needles showing bands of green and chlorotic tissues. **Fig. 249.** Light chlorosis on pine needles caused by the accumulation of alkaline residues. **Fig. 250.** Close-up of pine needles in Fig. 249 showing light chlorosis caused by the accumulation of alkaline residues.

251

252

253

254

255

256

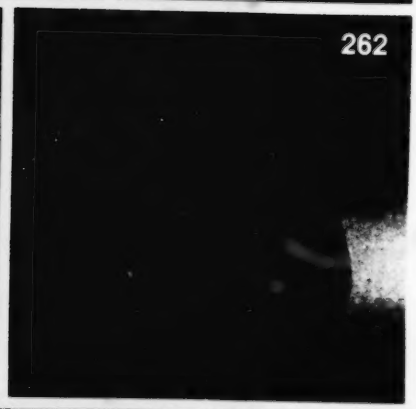
257

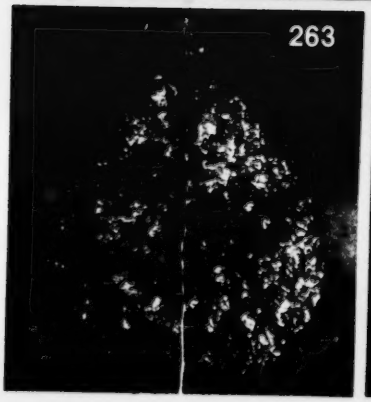
258

259

260

261


262


263

264

265

266

STATIONARY COMBUSTION ENGINES

Stationary combustion engines are used mostly for compressing natural gas, pumping natural gas and oil through pipelines, and generating electricity. The hydrocarbons in the natural gas, oil, diesel oil, or coal used to power the high-temperature engines produce emissions containing nitrogen oxides, partially combusted hydrocarbons, sulfur gases, and small quantities of carbon monoxide (CO).

At combustion temperatures higher than 3500°C some of the nitrogen in the air is oxidized to form nitrogen oxide (NO). As much as 40% of the total NO is then further oxidized within 1.5 km of the source to form nitrogen dioxide (NO_2) by photochemical reactions involving sunlight and hydrocarbons. NO_2 interacts photochemically to generate ozone (O_3) and peroxyacetyl nitrate (PAN).

NITROGEN OXIDES

Nitrogen oxides are probably the major pollutants from stationary combustion engines and can have phytotoxic effects on forest areas. NO_2 is a fairly common nitrogen oxide that can cause considerable injury to forest vegetation.

Young conifers subjected to moderately high concentrations of nitrogen oxides develop necrotic lesions on the needles or needle tip burning. Sometimes the initial symptoms appear as a ring of white markings close to the base of the needles (Fig. 251). With further fumigation, general bleaching occurs, and the affected tissues gradually turn necrotic (Fig. 252). Acute concentrations of NO_2, on the other hand, cause rapid necrosis of older needles from the tip back and general chlorosis of younger needles (Figs. 253 and 254).

In deciduous species, NO_2 initially causes nonspecific chlorosis, browning, or bleaching between the leaf veins, especially near margins (Figs. 255-257 and 259). These symptoms are followed by more intense discoloration or necrosis that spreads through the leaves in the form of irregular spots or general tissue collapse (Figs. 258 and 260). Tissue collapse first appears as water-soaked, collapsed areas, which later dry out and turn brown. In alder, severe interveinal chlorosis precedes necrosis, which is exemplified by a reddish brown discoloration (Fig. 261). Normally, mature leaves are more sensitive to nitrogen oxides than younger ones. Moist conditions appear to enhance the symptoms. Upon reaction with water on or within the leaf surfaces, NO_2 is converted to toxic compounds such as nitrous and nitric acids, caus-

---

POLLUTANT STRESSES–STATIONARY COMBUSTION ENGINES AND AGRICULTURAL CHEMICAL INDUSTRY (ANHYDROUS AMMONIA FERTILIZER). Symptoms of nitrogen oxides (from stationary combustion engines) and ammonia vapor (from anhydrous ammonia fertilizer) emissions on forest species (Figs. 251-266). All symptoms of nitrogen oxides were produced on plants grown in the laboratory under controlled conditions.

Nitrogen oxides: Fig. 251. Initial injury symptoms appear first at the base of young pine needles. **Fig. 252.** Advanced symptoms on pine resulting in general bleaching followed by brown coloration. **Fig. 253.** Chlorosis and needle tip necrosis on pine caused by an acute fumigation. **Fig. 254.** Close-up of chlorosis and needle tip necrosis on pine shown in Fig. 253. **Fig. 255.** Initial stage of chlorosis development on aspen. **Fig. 256.** Marginal and interveinal chlorosis and bleaching on poplar. **Fig. 257.** Early stage of marginal and interveinal necrosis on aspen. **Fig. 258.** Advanced interveinal and marginal necrosis on birch. **Fig. 259.** Initial symptoms of marginal and interveinal discoloration on willow. **Fig. 260.** Advanced necrotic symptoms on willow prior to total tissue collapse. **Fig. 261.** Symptoms of severe interveinal chlorosis and irregular necrosis on alder. **Ammonia vapor: Fig. 262.** Initiation of chlorosis on poplar. **Fig. 263.** Acute foliar injury on poplar, appearing first at the margins and then moving toward the middle. **Fig. 264.** Nonspecific leaf spotting on aspen. **Fig. 265.** Nonspecific leaf spotting and glazing on willow. **Fig. 266.** Discoloration of poplar as a result of a short exposure to ammonia vapor.

ing tissue injury when the concentrations exceed a certain threshold.

Chronic foliar injury as a result of continuous exposure to relatively low concentrations of nitrogen oxides appears as an enhancement of the green color followed by chlorosis and extensive leaf drop. Physiological injury can also occur at very low concentrations of nitrogen oxide, resulting in slower growth and lower yield without any visible symptoms of phytotoxicity. Such injury is probably brought about by inhibition of photosynthesis and other vital processes.

On deciduous species it may be difficult to accurately identify the symptoms of nitrogen oxide injury in the field. Several other pollutants such as SO_2, hydrogen chloride, and ozone as well as a magnesium deficiency produce chlorotic and necrotic symptoms that may be similar to those produced by NO_2. It is particularly important, therefore, to verify the existence of possible emission sources and to obtain air quality and meteorological information pertaining to the area.

OZONE AND PAN

An important product of NO_2 interaction with partially combusted hydrocarbons is photochemical smog containing O_3 and PAN. Photochemical smog generally originates from large urban areas as automobile exhaust and has the potential to cause injury to forest vegetation through long-range transport.

On deciduous species ozone causes chlorosis, necrosis, and flecking on the upper surface of leaves. Necrotic tissues can range from almost white to orange red in color, depending upon the species. Ozone can destroy small veins but leaves the large ones unaffected. In most deciduous plants, bleaching of the upper leaf surface is a common type of injury.

In conifers ozone produces mottled yellow and green patches of tissue on needle surfaces. In sensitive species the entire needle turns necrotic and drops prematurely. Necrosis begins at the needle tip, and the mottled symptoms occur in the zone below the necrotic tissues.

PAN generally causes glazing, bronzing, or silvering of the lower surface of deciduous leaves and may affect the upper surface in some species. Incipient chlorosis develops shortly after fumigation with high concentrations of PAN, and the injured area gradually becomes flaccid. Wilting may be followed by glazing and bronzing along the edge of the collapsed band. In severe injury the glazing and bronzing symptoms often do not develop. PAN symptoms on conifers have not been well described in the literature.

Suggested Reading

Hill, A.C., H.E. Heggestad, and S.N. Linzon. 1970. Ozone. Pages B1-B22 *in* Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Jacobson, J.S. and A.C. Hill (eds.). Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

Taylor, O.C. and D.C. MacLean. 1970. Nitrogen oxides and peroxyacyl nitrates. Pages E1-E14 *in* Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Jacobson, J.S. and A.C. Hill (eds.). Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

AGRICULTURAL CHEMICAL INDUSTRY

AMMONIA VAPOR

The major source of gaseous ammonia pollution is anhydrous ammonia, now commonly used as a fertilizer. If an accidental spill of anhydrous ammonia occurs during transport, the fumes can cause severe injury to vegetation. Injury can also be caused by leakage of ammonia from storage tanks; injured vegetation has been observed 3 km downwind from the site of an ammonia spill.

Ammonia injury is not always specific and may not be restricted to interveinal areas, which is the case with SO_2. In deciduous species, the foliage may or may not show chlorosis in response to low levels of ammonia. High concentrations of ammonia result in chlorosis of the whole leaf surface, which sometimes gives the foliage a cooked appearance (Fig. 262). Chlorotic symptoms are often followed by bronzing, which starts along the leaf margins and progresses toward the middle (Fig. 263). In many instances, ammonia causes scattered necrotic spotting and glazing of the upper surfaces of leaves (Figs. 264 and 265). Tree foliage that is moderately affected by ammonia vapor over a short period of time (Fig. 266) can recover rapidly after the fumigation incident.

There is little information on how ammonia affects conifers, because it is used mainly on agricultural areas in the parkland, where aspen and poplar predominate. Generally, old conifer needles turn dark and younger needles display a reddish yellow discoloration.

Suggested Reading

Heck, W.W., R.H. Daines, and I.J. Hindawi. 1970. Other phytotoxic pollutants. Pages F1-F24 *in* Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Jacobson, J.S. and A.C. Hill (eds.). Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

Temple, P.J., D.S. Harper, R.G. Pearson, and S.N. Linzon. 1979. Toxic effects of ammonia on vegetation in Ontario. Environmental Pollution 20:297-302.

Treshow, M. 1970. Environment and plant response. McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario. Pages 362-363 (ammonia).

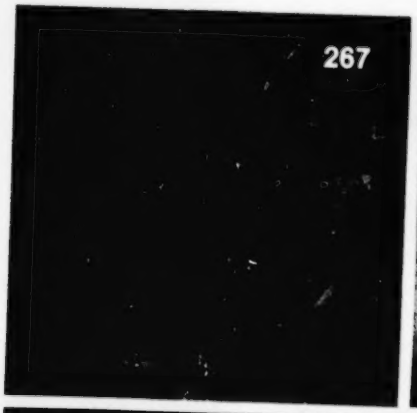
HERBICIDES, SOIL STERILANTS, AND PESTICIDES

Herbicides, soil sterilants, and pesticides represent a serious threat to the environment because of their wide use in agriculture. One of the pioneer agricultural chemicals, 2,4-D, and its derivatives are probably the most widely used, among the most phytotoxic, and under certain conditions the most selective of herbicides. Severe injury to vegetation can occur as far as several kilometres from the point of application as a result of chemical drift and sometimes because of the volatility of certain compounds.

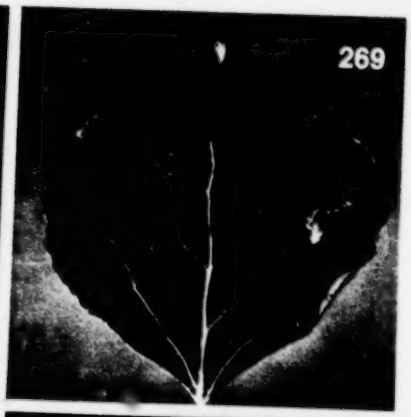
There are a number of herbicides, soil sterilants, and pesticides that can cause injury to vegetation; however, it is beyond the scope of this handbook to include them all.

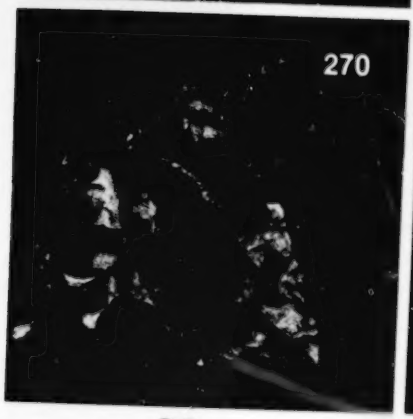
HERBICIDES

Many different herbicides are currently being used near forests. Only the more commonly used chemicals, 2,4-D and 2,4,5-T, are discussed here. These compounds are widely distributed and fairly toxic; they can injure a wide variety of plant species at very low concentrations. In general, 2,4-D is most effective in killing broadleaf vegetation. Grasses, cereals, and other monocots are relatively resistant to it. Almost all types of vegetation can be treated effectively with 2,4,5-T, which is used for brush control along energy transmission corridors.


267

268

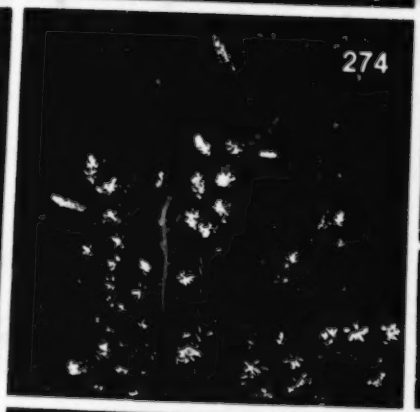

269


270

271

272

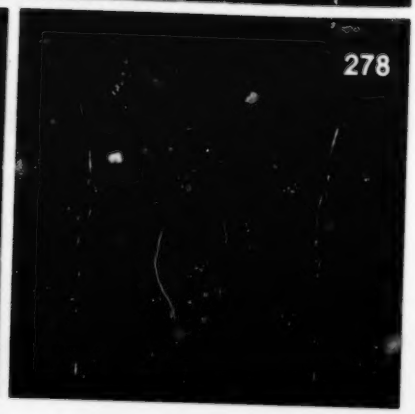
273


274

275

276

277


278

Poplar, willow, and aspen leaves are extremely sensitive to 2,4,5-T and turn necrotic even at low to moderate concentrations (0.25-1.0 kg/ha) (Figs. 267-269). Severe necrosis is often followed by foliar drop and tree mortality.

Low concentrations of 2,4-D act as a growth hormone by stimulating cell division and elongation; however, excessive growth at the expense of metabolites that are also required for other cellular processes results in eventual tissue collapse. Some of the typical growth responses to 2,4-D are epinasty (hooking) of terminal shoots, twisting and curling of tissues, and foliar bleaching (Figs. 270 and 271). Hooking, twisting, and curling symptoms are generally produced within a matter of hours after 2,4-D application and can lead to foliar discoloration and severe necrosis (Fig. 272).

In conifers, young needles are more sensitive to 2,4-D injury than old ones (Figs. 273 and 274), but the amount of 2,4-D required to injure or kill conifers is much higher than for deciduous species. In spruce, after the initial bleaching symptoms the needles start to turn brown (Fig. 275); eventually all foliar tissues, regardless of age, become reddish brown or necrotic, and the tree dies (Fig. 276). Pine responds to 2,4-D by producing twisted and necrotic needles (Figs. 277 and 278).

Suggested Reading

Heck, W.W., R.H. Daines, and I.J. Hindawi. 1970. Other phytotoxic pollutants (herbicides). Pages F3-F4 *in* Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Jacobson, J.S. and A.C. Hill (eds.). Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

Hindawi, I.J. 1970. Air pollution injury to vegetation. United States Department of Health, Education, and Welfare. National Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71. Pages 36-39.

Treshow, M. 1970. Environment and plant response. McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario. Page 378 (herbicides).

Turner, D.J. 1977. The safety of the herbicides 2,4-D and 2,4,5-T. Forestry Commission. Her Majesty's Stationery Office. London, England. Bulletin 57.

Yarish, W. 1980. Recognizing herbicide action and injury. Alberta Agriculture. Edmonton, Alberta. Agdex 641-7.

SOIL STERILANTS

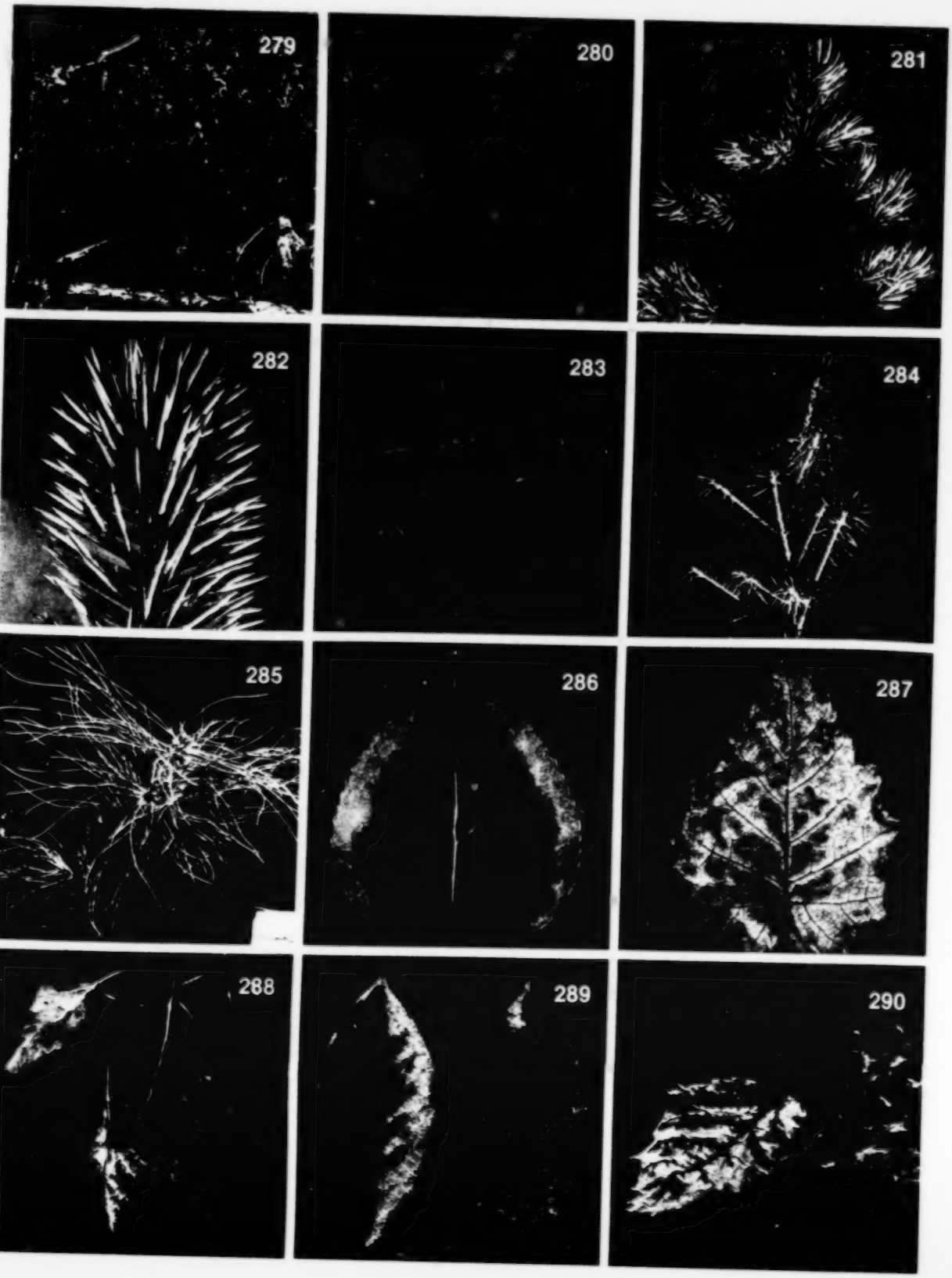
Certain sterilants may be partially lost by vaporization when applied to soils. Vapors of picloram from treated soils, for example, can be toxic to sensitive vegetation nearby. The rate of air movement and the temperature above the treated soil determine the extent of vaporization.

Soil application of picloram initially causes current-year needles of conifers to turn

---

POLLUTANT STRESSES—AGRICULTURAL CHEMICAL INDUSTRY (HERBICIDES). 2,4,5-T and 2,4-D symptoms on forest species (Figs. 267-278).

2,4,5-T: Fig. 267. Poplar leaf showing marginal necrosis. **Fig. 268.** Necrotic spotting on willow. **Fig. 269.** Tissue necrosis on aspen. **2,4-D: Fig. 270.** Poplar foliage showing bleaching, hooking, and curling symptoms on willow. **Fig. 271.** Bleaching, hooking, and curling symptoms on willow. **Fig. 272.** Curling, hooking, and severe foliar necrosis on birch. **Fig. 273.** Bleaching of new growth flushes on white spruce 1 week after a 2,4-D spray. **Fig. 274.** Close-up of bleached needles from the white spruce shown in Fig. 273. **Fig. 275.** Bleaching and subsequent brown discoloration of white spruce needles. **Fig. 276.** Advanced symptoms of almost total necrosis of white spruce. **Fig. 277.** Necrotic symptoms appearing first at the base of pine needles (young tissues). **Fig. 278.** Close-up of pine needles in Fig. 277 showing twisting and necrotic tissues.


279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290

brown, which is followed by general necrosis of the entire foliage and eventual tree mortality (Fig. 279). Picloram is especially effective in killing broadleaf vegetation, even when applied to the soil at very low concentrations (Fig. 280).

Bromacil, or Hyvar, is another important weed and brush killer that is very effective as a soil sterilant. It is normally used in noncrop areas, but it can cause injury to forest vegetation if carried there as aerial drift. In spruce it can cause severe chlorosis of young current-year needles and tip browning of older needles (Fig. 281). Yellowing appears to begin at the needle tip and progress downward (Fig. 282). The green zone below the chlorotic area is generally interrupted by small yellow markings (Fig. 282). This is unlike the SO_2 injury pattern, in which there is a very sharp boundary between the chlorotic or necrotic zone and the solid green zone. Bromacil injury in pine foliage is similar to that produced in spruce (Fig. 283).

Sodium chlorate is also used as a soil sterilant, especially for killing deep-rooted perennials. It acts on vegetation as both a defoliant and a desiccant, or drying agent. When used at high concentrations as a desiccant, it stops plant growth and development within a few hours after application. In conifers, soil application of sodium chlorate causes bleaching of young needles (Figs. 284 and 285).

In leaves of deciduous species such as aspen, soil application of sodium chlorate produces bleaching around the leaf edge and irregular white markings on the remainder of the leaf (Fig. 286). At high concentrations it causes foliar desiccation, necrosis (Fig. 287), and premature leaf drop.

Amitrole, because of its high phytotoxicity and persistence, is often used as a soil sterilant. It causes injury to vegetation by destroying leaf pigments, reducing moisture, and initiating defoliation, especially at low concentrations. Leaf chlorosis and necrosis (Fig. 288) are the direct results of its interference with chlorophyll pigments. Amitrole injury starts at the leaf tips and margins and gradually spreads to the entire leaf surface.

PESTICIDES

A diverse array of insecticides and fungicides is also in wide use. Compounds considered potentially toxic are given restricted status, and labels specify the conditions and limitations of their application. There are a number of pesticides that can cause injury if used on plants other than those for which the chemical has been tested. Many of these chemicals can injure forest vegetation and produce visible symptoms that may be similar to those produced by some air pollutants.

Insecticides, in general, can be more phytotoxic than fungicides. A commonly used insecticide for controlling insects on shade and shelterbelt trees and in agricultural crops is dimethoate. At higher than recommended dosages dimethoate can produce toxicity symptoms on broadleaf species similar to those produced by SO_2. On chokecherry leaves it causes distinct interveinal and marginal chlorosis (Fig. 289). Unlike SO_2

POLLUTANT STRESSES—AGRICULTURAL CHEMICAL INDUSTRY (SOIL STERILANTS AND PESTICIDES). **Picloram, bromacil, sodium chlorate, and amitrole soil sterilants and dimethoate pesticide symptoms on forest species (Figs. 279-290).**

Picloram: **Fig. 279.** Symptoms on pine. **Fig. 280.** Leaf discoloration of poplar. **Bromacil:** **Fig. 281.** Pronounced yellowing of current-year growth and tip burning of older white spruce needles. **Fig. 282.** Close-up of injury to current-year white spruce needles shown in Fig. 281. **Fig. 283.** Partial chlorosis of the current-year pine foliage starting at the needle tips and browning of older foliage. **Sodium chlorate:** **Fig. 284.** Bleaching of the current-year white spruce foliage 2 days after application of sodium chlorate. **Fig. 285.** Bleaching of young pine foliage. **Fig. 286.** Marginal bleaching of aspen. **Fig. 287.** Desiccation and necrosis of birch. **Amitrole:** **Fig. 288.** Necrotic injury to aspen. **Dimethoate:** **Fig. 289.** Interveinal and marginal chlorosis on chokecherry. **Fig. 290.** Bleaching and necrotic symptoms of birch.

symptoms, dimethoate symptoms appear on leaves of all ages, young leaves being more sensitive than the older ones. Dimethoate is also known to cause interveinal bleaching and brown discoloration in birch leaves (Fig. 290).

Suggested Reading

Hindawi, I.J. 1970. Air pollution injury to vegetation. United States Department of Health, Education, and Welfare. Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71. Pages 36-39.

Rich, S. 1975. Interactions of air pollution and agricultural practices. Pages 335-360 *in* Responses of plants to air pollution. Mudd, J.B. and T.T. Kozlowski (eds.). Academic Press, Inc. New York.

SUMMARY OF MAJOR INDUSTRIAL EMISSIONS AND VISIBLE INJURY SYMPTOMS ON FOREST VEGETATION

The following table provides brief descriptions of the visual symptoms that characterize the damage to coniferous and deciduous tree species by each of the industrial pollutant emissions discussed in this handbook. As noted in the remarks column, the visual damage caused by one pollutant may in some instances be similar to, or confused with, symptoms caused by another pollutant or a nonpollutant stress. When making a diagnosis it is recommended that the reader examine the appropriate industry section in the main body of the text to ensure an accurate assessment of the pollutant(s) causing the damage observed.

Industry	Major emissions	Visual symptoms coniferous
Natural gas and oil	SO_2	Yellowing of older needles followed by brown discoloration and tissue death. Discoloration appears first at needle tip and progresses toward needle base (Fig. 87). Generally sharp boundary between the discolored and green zones.
	Liquid hydrocarbons	Light-weight fractions give an oily appearance to foliage; heavy-weight fractions leave a tarry coating. Chlorotic symptoms first appear on younger needles at the point of contact with light-weight fractions. When hydrocarbons are uniformly sprayed, injury begins at needle tip, gradually spreading to needle base (Fig. 121).
	Saltwater spills	Light pink to deep magenta or reddish brown discoloration of current and 1-year-old needles initially (Fig. 146). Symptoms appear first at needle tip and gradually progress to base. Unlike natural fall senescence, salt-killed foliage remains attached to the branches much longer.
Metal mining and smelting	SO_2, heavy metals, and particulates	Chlorosis and necrosis appear first at the tip of older needles and gradually progress to the needle base (Fig. 179). Because of heavy metal presence, smelter emissions often produce bands of irregular discoloration on the needle surfaces (Fig. 198).
	Fluorides	Pine needles exhibit spectacular tip burn that rapidly extends toward the needle base. Injury first appears on current-year needles; older needles are fairly resistant.
Other minerals		
Cement	Dust containing mainly calcium, potassium, and sodium oxides	Stunted growth and premature needle drop. Cement dust residue often visible on needle surfaces.
Potash	Potassium and sodium chlorides	——[1]
Storage piles of calcareous materials		Coating of needles or stems with gypsum or other such materials.

SUMMARY OF MAJOR INDUSTRIAL EMISSIONS AND VISIBLE INJURY SYMPTOMS ON FOREST VEGETATION

Visual symptoms deciduous	Remarks
Initial wet appearance of leaf undersurfaces followed by interveinal and marginal discoloration (Fig. 102). Fast drying of leaves can cause curling and shriveling.	Pesticides such as dimethoate can produce symptoms on deciduous species similar to those caused by SO_2 ; but unlike SO_2 , young leaves are more sensitive to dimethoate than are the old ones. SO_2 can sometimes produce symptoms on deciduous species similar to those caused by NO_2 and ammonia vapor.
Localized injury to the leaf area at the point of contact. Light-weight fractions produce curling and twisting of foliar tissues (Figs. 130 and 135) followed by defoliation.	Herbicides such as 2,4-D and picloram can also produce twisting and curling of deciduous leaves. Herbicides, however, produce this response in all tissues, including twigs and branches.
Leaf tip and marginal chlorosis and necrosis advance rapidly inward over the entire leaf surface (Figs. 154 and 155) and are followed by leaf curling (Fig. 156).	The pathway of saltwater movement in a forest can often be delineated by the pattern of affected ground-cover foliage.
Leaf interveinal and marginal wet appearance followed by chlorosis (Fig. 208), necrosis (Fig. 210), and premature defoliation (Fig. 206). Symptoms produced are often irregular in pattern (Fig. 212), especially close to the emission source.	
A light green, water-soaked appearance is followed by tip and marginal necrosis, which eventually spreads to the entire leaf. Fluoride can cause mottling or necrotic banding at the point of accumulation.	
Same as for conifers.	
Similar to those produced by saltwater spills.	
Coating of leaves or stems with gypsum or other such materials.	

Continued on next page

Industry	Major emissions	Visual symptoms coniferous
Pulp and paper	H_2S, methyl mercaptan, dimethyl sulfide, sodium hydroxide, and ammonia	Stunted needle growth and bands of chlorotic and necrotic tissues at the points of contact with aerially dispersed liquid emissions (Fig. 248) close to the source. At more distant sites, gaseous pollutants produce chlorotic symptoms at the needle tip that progress to needle base (Fig. 246). Specks of liquid emission residue often noticed on foliar surfaces near the emission source.
Stationary combustion engines	Nitrogen oxides	Lesions on needle surfaces (Fig. 252) and often needle tip burn (Figs. 253 and 254). Symptoms appear first on older needles.
	Ozone	Mottled yellow and green patches of tissue occur on needle surface. Necrosis (if it occurs) begins at the needle tip, and the mottled symptoms occur in the zone below the necrotic tissue.
	PAN	——
Agricultural chemicals		
Anhydrous ammonia fertilizer	Ammonia vapor	Old needles often turn black. Younger needles display reddish yellow discoloration.
Herbicides	2,4-D	Bleaching followed by brown discoloration appears first on young needles (Figs. 273 and 274). Needles become twisted (Fig. 278).
	2,4,5-T	——
Soil sterilants	Picloram	Current-year needles are first to turn brown. General necrosis (Fig. 279) follows.

SUMMARY OF MAJOR INDUSTRIAL EMISSIONS AND VISIBLE INJURY SYMPTOMS ON FOREST VEGETATION continued

Visual symptoms deciduous	Remarks
Initial enhancement of green color followed by water-soaked appearance and development of irregularly shaped white, yellow, or brown spots on leaves (Figs. 256 and 257). Mature leaves more sensitive than younger ones.	Injury symptoms on deciduous species may be confused with those produced by SO_2, HCl, O_3, and magnesium deficiency.
Chlorosis, necrosis, and flecking occur on the upper leaf surface. Necrotic tissue can range from white to orange red in color, depending on species.	
Leaf wilting, which may be followed by glazing, bronzing, or silvering of the lower leaf surface. Upper leaf surfaces of some species may also be affected.	
Chlorosis develops over the entire leaf and foliage appears cooked (Fig. 262). Marginal bronzing follows, progressing toward the middle (Fig. 263). Glazed upper surfaces of leaves with necrotic spots are common (Figs. 264 and 265).	Ammonia injury on deciduous species is not always specific and may not be restricted to interveinal areas, as is the case with SO_2.
Hooking, twisting, curling, and bleaching of terminal shoots (Figs. 270 and 271).	Liquid hydrocarbons can also produce twisting and curling of deciduous leaves; however, liquid hydrocarbons do not affect twigs and branches.
Reddish brown discoloration of foliage even at low concentrations (Fig. 267).	
General necrosis of the entire leaf area even at low concentrations (Fig. 280).	

Continued on next page

Industry	Major emissions	Visual symptoms coniferous
Soil sterilants (continued)	Bromacil	Severe chlorosis of young current-year needles followed by tip burning of older needles (Fig. 281). Yellowing appears first at needle tip and progresses to base. Green zone below the chlorotic area often interrupted by small yellow markings.
	Sodium chlorate	Initial symptom is bleaching of young needles (Fig. 285). Necrosis follows.
	Amitrole	——
Pesticides	Dimethoate	——

[1] Insufficient information available.

SUMMARY OF MAJOR INDUSTRIAL EMISSIONS AND VISIBLE INJURY SYMPTOMS ON FOREST VEGETATION continued

Visual symptoms deciduous	Remarks
—	
Marginal bleaching with irregular white markings in the remainder of the leaf (Fig. 286) followed by necrosis and premature leaf drop.	
Chlorosis and necrosis appear first on the leaf tips and margins. Symptoms gradually spread to the entire leaf surface.	
Interveinal and marginal discoloration (Figs. 289 and 290).	SO_2 can produce symptoms on deciduous species similar to those caused by dimethoate; but unlike SO_2, symptoms appear on leaves of all ages. Young leaves are more sensitive than old ones.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge the expert and helpful criticism received from Drs. D.C. McCune of the Boyce Thompson Institute for Plant Research at Cornell University and S.N. Linzon of the Ontario Ministry of the Environment and the many valuable comments provided by the following: Drs. H.F. Cerezke, J.M. Powell, G.D. Hogan, Y. Hiratsuka, I.K. Edwards, and A.A. Khan of the Northern Forest Research Centre; Drs. P.J. Rennie and L.W. Carlson of the Canadian Forestry Service, Ottawa; J. Lack and A. Schulz of Alberta Environment; W.N. Barnes of the Alberta Forest Service; and D. Shaw of the Alberta Energy Resources Conservation Board.

We are grateful to the following at the Northern Forest Research Centre: P. Debnam, who took painstaking care with the photographs, P.A. Logan for expert editing, and R.M. Waldron and J.K. Samoil for supervising the production that transformed typewritten material into a handbook.

Constant encouragement and advice from Drs. R.W. Reid and G.T. Silver of the Northern Forest Research Centre provided the incentive and support for completion of the project.

GLOSSARY

Abscission layer: A special group of cells at the base of the leaf or fruit stalk, whose formation precedes leaf or fruit drop.

Acute symptom: Sudden and widespread necrosis of foliar tissues in response to high concentrations of air pollutants over a short period of time.

Additive effect: The combined effect of two or more factors is equal to the sum of the effects taken independently.

Aerosol: A suspension of ultramicroscopic particles of liquids or solids in air or gas.

Amino acids: Organic compounds that are building blocks for all proteins.

Analogs: One compound closely related to another.

Antagonistic effect: The combined effect of two or more factors is less than the sum of these effects taken independently.

Assimilation: The process whereby essential ingredients are utilized for the normal function of tissues.

Bioindicator: A biological species used as an indicator of air pollution impingement.

Blight: Disease or plant injury caused by fungi, bacteria, viruses, insects, or adverse climatic conditions; does not result in rotting.

Bryophytes: Nonflowering plants such as mosses and liverworts.

Calcareous: Materials containing calcium carbonate or other calcium salts.

Calciphile: A plant that grows mainly on alkaline soils rich in calcium.

Cambium: A layer of cells in higher plants that divide to form xylem on the inside and phloem on the outside of the stem.

Cellular metabolism: The process of formation and breakdown of organic compounds in living organisms.

Chelation: A process of binding a metal ion with one or more groups of another compound.

Chlorophyll: Green pigment of plants normally found in foliar tissues.

Chlorosis: Loss or reduction of green plant pigment or chlorophyll; generally, yellowing.

Chronic symptom: Chlorosis that may lead to necrosis after exposure of vegetation to variable concentrations of air pollutants over a long period of time.

Cladina: Ground lichens that are intricately branched and lacking cups.

Cladonia: Cup-shaped ground lichens that are not intricately branched.

Corticolous lichens: Growing on tree trunks or branches.

Crustose lichens: Crustlike lichen growing in close contact with the substratum.

Cuticle: A noncellular outer layer of waxy material secreted by epidermal and other inside cells; chief function is to prevent excessive water loss.

Depauperate: Falling short of the natural growth and development of its species.

Desiccation: Process of tissue dehydration, or loss of water.

Ecosystem: A single functional system that includes all living organisms and nonliving factors such as sunlight, temperature, moisture, soil, mineral elements, topography, and all their interactions.

Epidermis: The outermost layer of plant cells below the cuticle, normally one cell thick, that provides protection to the underlying parts.

Epinasty: An outward and downward growth of a plant part that is caused by more rapid growth of one side of the plant.

Epiphytic: Plant growing on the surface of other plants, not parasitically but for support.

Flaccid: Lacking firmness and stiffness.

Foliose lichens: Leaflike growth form.

Fruticose lichens: Shrubby or upright branched growth form.

Fruiting structure: An organ specialized for producing spores or seeds.

Fumigation: Exposure of vegetation to gas, vapor, or smoke, whether under laboratory or field conditions.

Fungal hyphae: Microscopic multicellular threads that make up the fungal thallus.

Herbicide: A chemical compound used to destroy or inhibit plant growth.

Hydrocarbons: A class of organic compounds containing hydrogen and carbon; includes those occurring in oil, tar sands, natural gas, and coal.

Hypogymnia: Leaflike lichens with hollow lobes, usually grey or greyish brown in color, that grow on trees.

Intercostal injury: See interveinal injury.

Interveinal injury: Chlorotic or necrotic symptoms between the veins of leaves.

Larva: The preadult feeding form of insects that develops through several stages before emerging as an adult.

Lichens: Complex lower plants composed of algal and fungal components.

Lichen thallus: The vegetative plant body of a crustose, foliose, or fruticose lichen.

Marginal leaf injury: Development of chlorotic or necrotic symptoms on the leaf margins.

Mesophyll: A layer of cells between epidermal layers of leaves that are capable of photosynthesis, respiration, and cell division.

Molecular weight: The sum of all the atomic weights in a chemical formula.

Monocot: A class of plant distinguished by the presence of an embryo that produces a single leaf.

Mottling: Mingling of other colored spots with normal green in the foliage.

Mycelium: A mass of interwoven hyphae that produce spores in fungi.

Necrosis: Death of living tissues, characterized by browning and drying.

Nucleus (pl. nuclei): Subcellular structure containing hereditary material and from which new cells may originate.

Nonbiodegradable: Not able to be destroyed or reduced to much simpler form by biological means.

Parmelia: Leaflike lichens with flattened thallus, found on tree trunks, rock surfaces, etc.

Particulate: Minute separate particles.

Peltigera: Large, succulent, leaflike lichens, greenish in color, that normally grow on soil or mosses.

pH: Negative logarithm of the hydrogen ion concentration in a solution, used as an indicator of the extent of acidity or alkalinity.

Phloem: Complex conducting tissues mainly responsible for translocation of foods from leaves to buds and roots.

Photosynthesis: The process by which green plants harness the energy of sunlight absorbed by chlorophyll to build organic compounds from carbon dioxide and water.

Phytotoxicity: Injury to plants in response to toxic compounds or other undesirable factors.

Predisposition: A condition or set of conditions enhancing susceptibility to other stress factors.

Red belt: Foliar damage resulting in reddish brown discoloration on conifers, caused by adverse weather conditions. Damage occurs mostly in the middle and upper foothills and in the eastern portions of major mountain passes of the Rocky Mountains.

Resinosis: Excessive leakage of resins from coniferous tissues, usually as a result of injury.

Respiration: Energy-yielding process by which high-energy foods are broken down into much simpler products.

Rosetting: Circular cluster of foliage.

Rust pustule: An elevated spot containing the fruiting structure of a parasitic fungus (rust).

Saxicolous lichens: Growing on rocks.

Senescence: Process of aging, leading to tissue death.

Siliceous: Relating to silica or silicates.

Stomata: Small openings in the epidermis of leaves facilitating gaseous exchange and transpiration.

Symptom: The visible evidence of an unhealthy condition.

Synergistic effect: The combined effect of more than one factor is greater than the sum of those effects taken independently.

Systemic: A compound absorbed by and translocated throughout the plant body.

Thallus: See lichen thallus.

Transitory symptom: Mild foliar chlorosis that develops after fumigation and from which full recovery is possible within a few days in an air-pollutant-free atmosphere.

Transpiration: The loss of water vapor from leaves, chiefly through stomata and other aerial parts of the plant.

Ultrastructure: The submicroscopic organization of the plant protoplasm,

Variegation: The irregular presence of different colors in plant leaf tissues due to suppression of normal pigment development.

Winter flecking: Formation of small irregular lesions on foliar surfaces, caused by winter injury.

Xylem: A complex tissue in higher plants, chiefly responsible for upward conduction of water and nutrients.

APPENDIXES

1. Common and scientific names of plants.
2. Common and scientific names of diseases.
3. Common and scientific names of insects.
4. Abbreviations and chemical nomenclature.

APPENDIX 1

COMMON AND SCIENTIFIC NAMES OF PLANTS[1]

Alder:	*Alnus crispa* (Ait.) Pursh
American elm:	*Ulmus americana* L.
Aspen:	*Populus tremuloides* Michx.
Alpine fir:	*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.
Balsam fir:	*Abies balsamea* (L.) Mill.
Balsam poplar:	*Populus balsamifera* L.
Birch:	*Betula papyrifera* Marsh.
Black spruce:	*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.
Bryoria:	*Bryoria* sp.
Caragana:	*Caragana arborescens* Lam.
Chokecherry:	*Prunus virginiana* L.
Colorado blue spruce:	*Picea pungens* Engelm.
Eastern larch:	*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch
Feather moss:	*Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G.
	Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt.
Green alder:	*Alnus crispa* (Ait.) Pursh
Ground-cover lichens[2]:	*Peltigera aphthosa* (L.) Willd.
	Most *Cladonia* sp.
Hypogymnia:	*Hypogymnia physodes* (L.) W. Wats.
Jack pine:	*Pinus banksiana* Lamb.
Labrador tea:	*Ledum groenlandicum* Oeder
Lodgepole pine:	*Pinus contorta* Loudon var. *latifolia* Engelm.
Manitoba maple:	*Acer negundo* L.
Parmelia:	*Parmelia sulcata* Tayl.
Peltigera:	*Peltigera aphthosa* (L.) Willd.
Pine:	*Pinus banksiana* Lamb.
	Pinus contorta Loudon var. *latifolia* Engelm.
Poplar:	*Populus balsamifera* L.
Reindeer lichens[2]:	*Cladina alpestris* (L.) Harm.
	C. mitis (Sandst.) Hale & W. Culb.
	C. rangiferina (L.) Harm.
	A few *Cladonia* sp.
Scots pine:	*Pinus sylvestris* L.
Tamarack:	*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch
Tree lichens:	*Bryoria* sp.
	Evernia mesomorpha Nyl.
	Hypogymnia physodes (L.) W. Wats.
	Parmelia sulcata Tayl.
	Usnea sp.
Trembling aspen:	*Populus tremuloides* Michx.
Usnea:	*Usnea* sp.
White birch:	*Betula papyrifera* Marsh.

White spruce:	*Picea glauca* (Moench) Voss
Wild sarsaparilla:	*Aralia nudicaulis* L.
Willow:	*Salix* sp.

---

[1] Lichens: Hale, M.E., Jr. and W.L. Culberson. 1970. A fourth checklist of the lichens of the continental United States and Canada. The Bryologist 73(3):499-543.

Mosses: Crum, H.A., W.C. Steere, and L.E. Anderson. 1973. A new list of mosses of North America north of Mexico. The Bryologist 76(1):85-130.

Vascular plants: Moss, E.H. 1959. Flora of Alberta. University of Toronto Press. Toronto, Ontario.

[2] Reindeer lichens are also ground-cover lichens.

APPENDIX 2

COMMON AND SCIENTIFIC NAMES OF DISEASES[1]

Armillaria root rot:	*Armillaria mellea* (Vahl ex Fr.) Kumm.
Birch leaf rust:	*Melampsoridium betulinum* (Fr.) Kleb.
Dutch elm disease:	*Ceratocystis ulmi* (Buism.) C. Moreau
Dwarf mistletoe of lodgepole pine:	*Arceuthobium americanum* Nutt. ex Engelm.
Elytroderma needle cast:	*Elytroderma deformans* (Weir) Darker
Poplar leaf spot:	*Marssonina populi* (Lib.) Magn.
Shoot blight of aspen:	*Venturia macularis* (Fr.) E. Müll & Arx
Snow blight of spruce:	*Sarcotrochila* sp.
Spruce needle cast:	*Lophodermium* sp.
Spruce needle rust:	*Chrysomyxa ledicola* Lagh.
Willow leaf rust:	*Melampsora epitea* Thüm.
Yellow witches'-broom rust of spruce (dwarf mistletoe):	*Chrysomyxa arctostaphyli* Diet.

[1] Agriculture Québec. 1975. Names of plant diseases in Canada. 2nd edition. Québec City, Québec. Publication QA38-R4-1.

APPENDIX 3

COMMON AND SCIENTIFIC NAMES OF INSECTS[1]

Ambermarked birch leaf miner:	*Profenusa thomsoni* (Konow)
Cottonwood leaf-mining beetle[2]:	*Zeugophoira scutellaris* Suffr.
Early aspen leaf curler:	*Pseudexentera oregonana* Wishm.
***Eriophyes* gall mite:**	*Eriophyes* sp.
Forest tent caterpillar:	*Malacosoma disstria* Hbn.
Jack pine budworm:	*Choristoneura pinus pinus* Free.
Lodgepole terminal weevil:	*Pissodes terminalis* Hopping
Mountain pine beetle:	*Dendroctonus ponderosae* Hopk.
Northern lodgepole needle miner[3]:	*Colestechnites starki* (Free.)
Spruce budworm:	*Choristoneura fumiferana* (Clem.)
Spruce needle miner:	*Taniva albolineana* (Kft.)
Spruce spider mite:	*Oligonychus ununguis* (Kft.)
White pine weevil:	*Pissodes strobi* (Peck)
Willow leaf miner[4]:	*Lyonetia* sp.

---

[1] Source unless otherwise noted:
Agriculture Québec. 1975. Noms français d'insectes au Canada. (French names of insects in Canada with corresponding Latin and English names.) 4th edition. Québec City, Québec. Publication QA38-R4-30.

[2] MacAloney, H.J. and H.G. Ewan. 1964. Identification of hardwood insects by type of tree injury, north central region. United States Department of Agriculture, Forest Service. Lake States Forest Experiment Station and North Central Region. St. Paul, Minnesota. Research Paper LS-11.

[3] Furniss, R.L. and V.M. Carolin. 1977. Western forest insects. United States Department of Agriculture, Forest Service. Miscellaneous Publication 1339

[4] Canadian Forestry Service. 1976. Forest insect and disease survey annual report, 1975. Fisheries and Environment Canada. Ottawa, Ontario.

APPENDIX 4

ABBREVIATIONS AND CHEMICAL NOMENCLATURE

Amitrole:	3-amino-1,2,4-triazole
Bromacil:	5-bromo-3-sec-butyl-6-methyluracil
CO:	Carbon monoxide
Dimethoate:	O, O-Dimethyl phosphorodithioate S-ester with 2-mercapto-N-methylacetamide
Gypsum:	Calcium sulfate
H_2S:	Hydrogen sulfide
Hyvar:	See Bromacil
NaCl:	Sodium chloride
NO:	Nitric oxide
NO_2:	Nitrogen dioxide
NO_x:	Nitrogen oxides
O_3:	Ozone
PAN:	Peroxyacetyl nitrate
Picloram:	4-amino-3,5,6-trichloropicolinic acid
ppb:	Parts per billion
ppm:	Parts per million
SO_2:	Sulfur dioxide
2,4-D:	2,4-dichlorophenoxyacetic acid
2,4,5-T:	2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid

POLLUTANT AND VEGETATION INDEX

acetylene, 29

acid mists, hydrochloric, 35, **165, 166, 169-172**
  pollutant stress symptoms on
    birch, **171, 172**
    pine, **165**
    poplar, **169, 170**
    spruce, white, **166**

acid mists, sulfuric, 19, 35, **167, 168**
  pollutant stress symptoms on aspen, **167, 168**

agricultural chemical industry, 53-58, 62, **262-290**
  anhydrous ammonia fertilizer, *see* ammonia vapor
  herbicides, *see* 2,4-D and 2,4,5-T
  pesticides, *see* dimethoate
  soil sterilants, *see* amitrole, bromacil, picloram, and sodium chlorate

alder, green
  healthy, 7, **10**
  pollutant stress symptoms,
    hydrocarbons (liquid), **135**
    nickel-copper-zinc smelters, 41, **214**
    nitrogen oxides, 51, **261**
    sulfur dioxide, 20, **106**

alkaline sprays, 49, **249, 250**
  pollutant stress symptoms on pine, **249, 250**

aluminum, 20, 33

aluminum silicate, 20

aluminum smelters
  (*see* fluoride)

amitrole, 57, 64, **288**
  pollutant stress symptoms on aspen, **288**

ammonia, 47, 62

ammonia vapor (*from* anhydrous ammonia fertilizer), 53, 62, **262-266**
  pollutant stress symptoms on
    aspen, 53, **264**
    poplar, 53, **262, 263, 266**
    willow, **265**

ammonium salts, 47

natural stress symptoms
  climate, 11, **20, 22, 23, 29**
  diseases, **59**
  insects, **73, 77**
pollutant stress symptoms
  acid (sulfuric) mists, **167, 168**
  ammonia vapor, 53, **264**
  cement dust, **223**
  herbicides, 2,4,5-T, 55, **269**
  hydrocarbons (liquid), **131-133, 137, 138**
  nickel-copper-zinc smelters, 39, **208-210**
  nitrogen oxides, **255, 257**
  potash industry, **227-230**
  saltwater spills, 31, **154, 155**
  soil sterilants
    amitrole, **288**
    sodium chlorate, 57, **286**
  sulfur dioxide, 20, **79, 101-103**

automobile exhaust, 52

base-line conditions, 3, 5, 23

birch, white
  healthy, 5, **8**
  natural stress symptoms
    diseases, **56, 62**
    insects, **71, 72, 76**
    nutrient deficiency, 13, **38, 39, 42, 43, 47**
  pollutant stress symptoms
    acid (hydrochloric) mists, **171, 172**
    herbicides, 2,4-D, **272**
    hydrocarbons (liquid), **130**
    nickel-copper-zinc smelters, 39, **205-207**
    nitrogen oxides, **258**
    pesticides, dimethoate, 58, **290**
    saltwater spills, 31, **151, 152**
    soil sterilants, sodium chlorate, **287**
    sulfur dioxide, 20-21, **95-98**

boron, 15

bromacil, 57, 64, **281-283**
  pollutant stress symptoms on
    pine, 57, **283**
    spruce, white, 57, **281, 282**

bryophytes
  (*see* ground-cover vegetation, bryophytes)

calcareous storage piles (*includes* calcareous, gypsum, and siliceous dusts), 46, 60, **231-234**
pollutant stress symptoms on
deciduous species, **231, 233**
spruce, white, **232, 234**

calcium oxide
(*see* cement dust)

caragana, 46

carbon monoxide, 51

cement dust (*includes* calcium, potassium, and sodium oxides and gypsum), 45, 60, **221-223**
pollutant stress symptoms on
aspen, **223**
bryophytes, 45
herbaceous plants and grasses, 45
lichens, 45
spruce, white, **221**
willow, **222**
woody plants, 45, 222

chokecherry
healthy, 7
pollutant stress symptoms, pesticides, 57, **289**

climate, 9, 11, 13, **18-33**
drought, 9, 11, **18-21**
excessive moisture, 11, **22**
flooding, 11, **22**
frost, 11, **25-29**
hail, 11, **24**
heat, fire, 11, **32, 33**
heat, winter flecking, 11, 21, **30, 31**
lack of precipitation, 9, **18, 19**
natural senescence, 11, 31, **23**
red belt, 9, 11, **21**
temperature and light, 11, **25-33**
winter drying, 9, **20, 21**

coal-fired generators and coal dust, 25, 29, 30, 33, 51

copper, 15, 36

diesel oil, 51

dimethoate, 57-58, 64, **289, 290**
pollutant stress symptoms on
birch, 58, **290**
chokecherry, 57, **289**

bacteria, 15
birch leaf rust, **56**
Dutch elm disease, 17
dwarf mistletoe of pine and spruce, 15-16, **55**
Elytroderma needle cast, 15, **52-54**
leaf rusts, 16, **56, 57**
leaf spots, 16, **58**
mildew, powdery, 16
needle cast, 15, **49, 52-54**
needle rust, 15, **50, 51**
nematodes, 15
poplar leaf spot, **58**
shoot blight 16, **59**
shoot blight of aspen, **59**
snow blight, 15, **48**
snow blight of spruce, **48**
spruce needle cast, **49**
spruce needle rust, **50, 51**
root diseases, 16, **60-62**
viruses, 15
willow leaf rust, **57**
yellow witches'-broom rust of spruce, **55**

dusts
(*see* calcareous storage piles, cement dust, and coal-fired generators and coal dust)

elemental sulfur, 19, 33, **159-161**
pollutant stress symptoms on
herbaceous plants and grasses, 33, **161**
spruce, black, 33, **159**
spruce, white, **160**
tamarack, 33
woody plants, **161**

elm, American, 17, 46

ethylene, 29-30
coal-fired generators, 29

feather mosses
(*see* ground-cover vegetation, bryophytes)

fertilizer, 53

fertilizer industry, 39, 41

fir, alpine, 20

fir, balsam
healthy, 5
natural stress symptoms, insects, 16

flare pits and well blowouts, 33-35, **162-164**
pollutant stress symptoms on
conifers, **162**
lichens, 35
pine, **164**
spruce, white, **163**

fluoride (aluminum smelters), 3, 39, 41, 60, **199, 200**
pollutant stress symptoms on
deciduous species, 41
pine, 39, **199, 200**
spruce, black, 39
spruce, white, 39

fungicides, 57

ground-cover vegetation, bryophytes
(*includes* mosses, feather mosses, and liverworts)
as bioindicators, 3, 41
healthy, 7, **16**
pollutant stress symptoms
cement dust, 45
hydrocarbons (liquid), 29, **142**
nickel-copper-zinc smelters, 41, 43, **218, 219**
saltwater spills, 31, **158**

ground-cover vegetation, herbaceous plants and grasses
healthy, 7
pollutant stress symptoms
cement dust, 45
elemental sulfur, 33, **161**
hydrocarbons (liquid), 27-29, **125, 141, 142**
nickel-copper-zinc smelters, 43, **176, 219**
potash industry, **224**
saltwater spills, 31, **158**

ground-cover vegetation, lichens,
as bioindicators, 3, 4, 35, 37, 39
healthy, 7, **14, 15, 17**
pollutant stress symptoms
cement dust, 45
flare pits and well blowouts, 35
hydrocarbons (liquid), 27, 29, **126, 142**
nickel-copper-zinc smelters, 37, 39, 41, 43, **188, 201, 217-220**
pulp and paper industry, 47, **235-241**
saltwater spills, 31

ground-cover vegetation, woody plants
healthy, 7
pollutant stress symptoms
nitrogen oxides, stationary combustion engines, 51-52, **259-261**
saltwater spills, 31, **153, 157, 158**
sulfur dioxide, 21, 23, **100, 105, 106, 108-110**
(*see also* alder, chokecherry, Labrador tea, rose, sarsaparilla, and willow)

gypsum dust
(*see* calcareous storage piles and cement dust)

healthy vegetation, 5-7, **2-17**
(*see also* individual species listings)

heavy metals (trace elements, particulates), 3, 13, 15, 60
coal-fired generators, 25, 30
natural gas and oil industry, 19, 25, 30
nickel-copper-zinc smelters, 36-43, 60
(*see also* arsenic, cadmium, copper, iron, lead, manganese, mercury, molybdenum, nickel, vanadium, and zinc)

herbaceous plants and grasses
(*see* ground-cover vegetation, herbaceous plants and grasses)

herbicides
(*see* 2,4-D and 2,4,5-T)

hydrocarbons, coal-fired generators, 25, 29-30, 51

hydrocarbons, natural gas and oil industry, 19, 23, 25-30, **111-142**
flare pits and well blowouts, 33
gaseous, 23, 25, 29, 30
liquid, heavy-weight, 23, 25-29, 60, **111, 112, 115, 116, 136-138**
phytotoxicity, 25
pollutant stress symptoms on
aspen, **137, 138**
conifers, 25-27, **111, 112, 115, 116**
deciduous species, 27-29, **137, 138**
pine, **115**
spruce, white, **111, 112, 116**
willow, **136**
liquid, light-weight, 23, 25-29, 60, **113, 114, 117-135, 138-142**
phytotoxicity, 25
pollutant stress symptoms on
alder, **135**
aspen, **131-133, 138**
birch, **130**
bryophytes, 29, **142**

lichens, 27, 29, **126, 142**
pine, **117**
poplar, **134**
rose, **139**
sarsaparilla, **140**
spruce, white, **113, 114, 118, 120, 122, 123**
tamarack, **119**
willow, **127-129**
woody plants, 29, **127-129, 135, 139-142**

hydrocarbons, stationary combustion engines, 51, 52

hydrochloric acid
(*see* acid mists)

hydrogen chloride, 52

hydrogen sulfide
natural gas and oil industry, 19, 33, 35
pulp and paper industry, 47, 62

impingement area (pattern, zone), 3-4, 20, 35, 37, 41

insecticides
(*see* dimethoate and pesticides)

insects, 16-17, 18, **63-78**
ambermarked birch leaf miner, **72**
bark beetles, 17
budworms, 16, **63-65**
cottonwood leaf-mining beetle, **73**
defoliators, 16-17, **71**
Dutch elm disease, 17
early aspen leaf curler, **77**
Eriophyes gall mite, **78**
forest tent caterpillar, 17
gall midges, 16
gall mites, 17, **78**
jack pine budworm, 16, **64, 65**
leaf miners, 17, **72-76**
leaf rollers, 17, **77**
lodgepole terminal weevil, **69**
mountain pine beetle, 17
needle miners, 16, **66, 67**
northern lodgepole needle miner, **66**
sawflies, defoliating, 16
sawflies, shoot-boring, 16
spruce budworm, 16, **63**
spruce needle miner, **67**
spruce spider mite, 16, **70**
weevils, 16, **68, 69**
white pine weevil, **68**
willow leaf miner, **74**

Labrador tea
healthy, **11**
pollutant stress symptoms
nickel-copper-zinc smelters, 41, **215, 216**
saltwater spills, **157**
sulfur dioxide, **109**

lead, 30, 36

lichens
(*see* ground-cover vegetation, lichens)

liverworts
(*see* ground-cover vegetation, bryophytes)

long-range transport (airborne) of pollutants, 9, 16, 52

magnesium, 33, 45, 52

manganese, 15, 20, 45

maple, Manitoba
pollutants stress symptoms, potash industry, 46, **226**

mercury, 30, 36

metal mining and smelting industry, 36-43, 60, **173-220**
(*see also* nickel-copper-zinc smelters, fluoride [aluminum smelters], heavy metals, and sulfur dioxide)

methyl mercaptan, 47, 62

molybdenum, 13

mosses
(*see* ground-cover vegetation, bryophytes)

natural gas and oil industry, 19-35, 60, **79-172**
(*see also* acid mists, elemental sulfur, flare pits and well blowouts, heavy metals, hydrocarbons [coal, gaseous, liquid], hydrogen sulfide, nitrogen oxides, saltwater spills, sulfur, and sulfur dioxide)

natural stress symptoms, 3, 5, 9-17, **18-78**
(*see also* climate, diseases, insects, nutrient deficiency, and individual species listings)

nickel-copper-zinc smelters (*includes* heavy metals, SO_2, and particulates), 36-43, **173-198, 201-220**
phytotoxicity, 36
pollutant stress symptoms on
alder, 41, **214**
aspen, 39, **208-210**
birch, 39, **205-207**
bryophytes, 41, 43, **218, 219**
conifers, 36-39, **173-187, 189-198, 201-204**
deciduous species, 39, 41, **205-212**
herbaceous plants and grasses, 43, **176, 219**
Labrador tea, 41, **215, 216**
lichens, 37, 39, 41, 43, **188, 201, 217-220**
pine, 37, 39, **189-198, 201-204**
poplar, 39, **211, 212**
spruce, 36-37, **177-187**
spruce, black, 37, **181-187**
spruce, white, **177-180**
willow, 41, **213**
woody plants, 41, **213-216**

nitric acid, 51

nitrous acid, 51

nitrogen, 13

nitrogen dioxide, 51-52

nitrogen oxide, 51

nitrogen oxides, coal-fired generators, 25, 30, 51

nitrogen oxides, natural gas and oil industry, 19, 35

nitrogen oxides, stationary combustion engines, 51-52, 62, **251-261**
pollutant stress symptoms on
alder, 51, **261**
aspen, **255, 257**
birch, **258**
conifers, 51, **251-254**
deciduous species, 51-52, **255-258**
pine, **251-254**
poplar, **256**
willow, **259, 260**
woody plants, 51-52, **259-261**

nutrient deficiency, 13, 15, 18, 20, **34-47**
boron, 15
copper, 15
iron, 13, **44, 45**
magnesium, 52
manganese, 15

other mineral industries, 45-46, **221-234**
(*see* calcareous storage piles [calcareous, gypsum, and siliceous dusts], cement dusts [calcium, potassium, and sodium oxides], and potash industry [potassium and sodium chlorides])

ozone, 51-52, 62

PAN, 51-52, 62

particulates, 19, 36, 60

pesticides
(*see* dimethoate)

phosphorus, 13, 39

photochemical smog, 52

phytotoxicity, 18
hydrocarbons (liquid), 25
nickel-copper-zinc smelters, 36
potash industry, 46
saltwater spills, 30-31
sulfur dioxide, 19-20, 29

picloram, 55-57, 62, **279, 280**
pollutant stress symptoms on
pine, **279**
poplar, **280**

pine, jack and lodgepole
healthy, 5, **2, 3**
natural stress symptoms
climate, **21, 24-27, 30, 31**
diseases, 15, **52-54, 60, 61**
insects, 16-17, **64-66, 69**
nutrient deficiency, **40, 44, 45**
pollutant stress symptoms
acid (hydrochloric) mists, **165**
fluoride, 39, **199, 200**
herbicides, 2,4-D, 55, **277, 278**
hydrocarbons (liquid), **115, 117**
nickel-copper-zinc smelters, 37, 39, **189-198, 201-204**
nitrogen oxides, **251-254**
pulp and paper industry, 47-49, **242-250**
saltwater spills, 31, **144, 147, 148, 150**
soil sterilants
bromacil, 57, **283**
picloram, **279**
sodium chlorate, **285**

pollutant stress factors, 3, 4, 18, 36, 37, 45
biological, 19, 25, 30-31, 35
chemical, 19, 20
climatic, 11, 55
edaphic (soil), 20, 25, 33
(*see also* impingement area, long-range transport, phytotoxicity, and species sensitivity to pollutants)

polyethylene, 29

poplar, balsam
healthy, 5, **6**
natural stress symptoms
climate, **19**
diseases, **58**
nutrient deficiency, **41**
pollutant stress symptoms
acid (hydrochloric) mists, **169, 170**
ammonia vapor, 53, **262, 263, 266**
herbicides
2,4-D, **270**
2,4,5-T, 55, **267**
hydrocarbons (liquid), **134**
nickel-copper-zinc smelters, 39, **211, 212**
nitrogen oxides, **256**
potash industry, 46
saltwater spills, **156**
soil sterilants, picloram, **280**
sulfur dioxide, 20, 21, **99, 104, 107**

potash industry (*includes* potassium and sodium chlorides), 46, 60, **224-230**
phytotoxicity, 46
pollutant stress symptoms on
aspen, **227-230**
herbaceous plants and grasses, **224**
maple, Manitoba, 46, **226**
willow, 46, **225**
table of species sensitivities, 46

potassium, 13

potassium chloride (salt)
(*see* potash industry)

potassium oxide
(*see* cement dust)

propylene, 29

pulp and paper industry, 47-49, 62, **235-250**
acid sulfite process, 47
alkaline (kraft) process, 47

reclamation
heavy metals and sulfur dioxide, 36, 37
oil spills, 25
saltwater spills, 30

rose, prickly
healthy, 7, **12**
pollutant stress symptoms
hydrocarbons (liquid), **139**
sulfur dioxide, **110**

saltwater spills, 30-32, 33, 46, 60, **143-158**
phytotoxicity, 30-31
pollutant stress symptoms on
aspen, 31, **154, 155**
birch, 31, **151, 152**
bryophytes, 31, **158**
conifers, 30-31, **143-150**
deciduous species, 31, **151, 152, 154-156**
herbaceous plants and grasses, 31, **158**
Labrador tea, **157**
lichens, 31
pine, 31, **144, 147, 148, 150**
poplar, **156**
spruce, 31, **143, 145, 146, 149**
spruce, black, **145, 146, 149**
spruce, white, **143**
willow, **153**
woody plants, 31, **153, 157, 158**

sarsaparilla, wild
healthy, 7, **13**
pollutant stress symptoms
hydrocarbons (liquid), **140**
sulfur dioxide, **108**

selenium, 19

siliceous dusts
(*see* calcareous storage piles)

sodium chlorate, 57, 64, **284-287**
pollutant stress symptoms on
aspen, 57, **286**
birch, **287**
conifers, 57, **284, 285**
deciduous species, 57, **286, 287**
pine, **285**
spruce, white, **284**

sodium chloride (salt)
(*see* flare pits and well blowouts, potash industry,

soil sterilants
(*see* amitrole, bromacil, picloram, and sodium chlorate)

species sensitivity to pollutants, 4, 18
herbicides, 55
nickel-copper-zinc smelters, 36, 37, 39, 41
potash industry, 46
saltwater spills, 31
sulfur dioxide, 20

spruce, black
healthy, 5
natural stress symptoms
climate, 11
diseases, 48
pollutant stress symptoms
elemental sulfur, 33, 159
fluoride, 39
nickel-copper-zinc smelters, 37, 181-187
saltwater spills, 145, 146, 149
sulfur dioxide, 20, 84, 88, 91

spruce, Colorado blue, 46

spruce, white
healthy, 5, 4, 5
natural stress symptoms
climate, 18, 28, 32, 33
diseases, 49-51, 55
insects, 63, 67, 68, 70
nutrient deficiency, 34, 35
pollutant stress symptoms
acid (hydrochloric) mists, 166
calcareous storage piles, 232, 234
cement dust, 221
elemental sulfur, 160
fluoride, 39
herbicides, 2,4-D, 273-276
hydrocarbons (liquid), 111-114, 116, 118, 120, 122, 123
nickel-copper-zinc smelters, 37, 177-180
saltwater spills, 143
soil sterilants
bromacil, 281, 282
sodium chlorate, 284
sulfur dioxide, 20, 79, 86, 90, 94
well blowouts, 163

stationary combustion engines, 51-52, 62, 251-261
(*see also* nitrogen oxides, ozone, PAN, and sulfur dioxide)

sulfate, 19

sulfite, 19

deficiency, 15
metal mining and smelting industry, 36, 37
natural gas and oil industry, 19, 33
(*see also* elemental sulfur)

sulfur dioxide
coal-fired generators, 25, 30
metal mining and smelting industry (nickel-copper-zinc smelters), 36-43, 60
natural gas and oil industry, 19-25, 33-35, 60, 79-110
phytotoxicity, 19-20
acute, 20
chronic, 20
transitory, 20
pollutant stress symptoms on
alder, 106
aspen, 79, 101-103
birch, 21, 95-98
conifers, 20-21, 79-94
deciduous species, 21, 23, 95-99, 101-104, 107
fir, balsam, 83
Labrador tea, 109
pine, 20-21, 79-82, 85, 87, 89, 92, 93
poplar, 21, 99, 104, 107
rose, 110
sarsaparilla, 108
spruce, black, 20, 84, 88, 91
spruce, white, 20, 79, 86, 90, 94
willow, 21, 100, 105
woody plants, 21, 23, 100, 105, 106, 108-110
table of species sensitivities, 20
pulp and paper industry, 47
(*see also* sulfur gases)

sulfur gases, 33, 47, 49, 51

sulfuric acid,
(*see* acid mists)

tamarack
healthy, 5
natural stress symptoms
climate, 11
insects, 16
pollutant stress symptoms
elemental sulfur, 33
hydrocarbons (liquid), 119
sulfur dioxide, 20

2,4-D, 53-55, 62, 270-278

spruce, 55
spruce, white, **273-276**
willow, **271**

2,4,5-T, 53-55, 62, **267-269**
pollutant stress symptoms on
aspen, 55, **269**
poplar, 55, **267**
willow, 55, **268**

vanadium, 30

well blowouts
(*see* flare pits and well blowouts)

willow
healthy, 7, **9**
natural stress symptoms
diseases, **57**
insects, **74**, **75**, **78**
nutrient deficiency, 13, **36**, **37**, 46
pollutant stress symptoms
ammonia vapor, **265**
cement dust, **222**
herbicides
2,4-D, **271**
2,4,5-T, 55, **268**
hydrocarbons (liquid), **127-129**, **136**
nickel-copper-zinc smelters, 41, **213**
nitrogen oxides, **259**, **260**
potash industry, 46, **225**
saltwater spills, **153**
sulfur dioxide, 20, 21, **100**, **105**

woody plants
(*see* ground-cover vegetation, woody plants)

zinc, 15, 36

Environnement Canada
Service canadien des forêts

Environment Canada
Canadian Forestry Service

Diagnostic des symptômes des stress provoqués par les polluants atmosphériques et les agents naturels sur la végétation forestière dans l'Ouest canadien

S.S. Malhotra et R.A. Blauel

Centre de recherches forestières du Nord • Edmonton (Alberta) • Rapport d'information NOR-X-228F

ISSN 704-7673

Diagnostic des symptômes des stress provoqués par les polluants atmosphériques et les agents naturels sur la végétation forestière dans l'Ouest canadien

S.S. Malhotra et R.A. Blauel

Rapport d'information NOR-X-228F
1983

Centre de recherches forestières du Nord
Service canadien des forêts
Environnement Canada
5320, 122e rue
Edmonton (Alberta), Canada
T6H 3S5

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1983
N° de cat. Fo46-12/228F
ISBN 0-662-92286-7

Cette publication est disponible sans frais à
l'adresse suivante:
Centre de recherches forestières du Nord
Environnement Canada
5320, 122e rue
Edmonton (Alberta)
T6H 3S5

This publication is also available in English
under the title *Diagnosis of air pollutant
and natural stress symptoms on forest
vegetation in western Canada.*

Résumé

En Alberta, en Saskatchewan, au Manitoba et dans les Territoires du Nord-Ouest, les industries émettent dans l'air des polluants susceptibles d'endommager la végétation forestière environnante. Le présent rapport décrit les symptômes des stress provoqués par ces polluants ainsi que ceux qui le sont par les agents naturels et qui peuvent leur ressembler. Les secteurs polluants considérés sont les installations de traitement du gaz naturel, les puits et raffineries de pétrole, les installations de traitement des sables pétrolifères, les mines et fonderies de métaux, les cimenteries, l'industrie de la potasse, les fabriques de pâtes et de papiers, de même que la production et l'utilisation des produits chimiques agricoles. Le rapport contient 19 pages de photographies en couleurs donnant des exemples des symptômes sur la végétation forestière.

Abstract

Industrial operations in Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and the Northwest Territories release airborne emissions that can injure surrounding forest vegetation. This report describes symptoms of these pollutants and of natural stresses that may appear similar. The industries discussed include natural gas processing plants, oil wells and refineries, oil sand plants, metal mines and smelters, cement plants, potash industry, pulp and paper mills, and agricultural chemical production and application. Nineteen pages of color photographs provide examples of these symptoms on forest vegetation.

Malhotra, S.S. and R.A. Blauel. 1980. Diagnosis of air pollutant and natural stress symptoms on forest vegetation in western Canada. Environ. Can., Can. For. Serv., North. For. Res. Cent. Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR-X-228.

Préface

En Alberta, en Saskatchewan, au Manitoba et dans les Territoires du Nord-Ouest, des polluants atmosphériques pouvant avoir des effets nocifs sur la végétation forestière environnante sont émis en quantités considérables par des activités industrielles très diverses : installations de traitement du gaz naturel, puits et raffineries de pétrole, installations de traitement des sables pétrolifères, mines et fonderies de métaux, cimenteries, exploitation de la potasse, usines de pâtes et papiers, production et utilisation de produits chimiques agricoles. Les principaux polluants émis sont l'anhydride sulfureux, les oxydes d'azote, les hydrocarbures, les métaux lourds, des particules, des poussières renfermant des oxydes de calcium, de potassium et de sodium, et l'eau salée.

Souvent, les symptômes visibles sur la végétation sont les seuls moyens de reconnaître un problème de pollution de l'air et d'en évaluer l'ampleur. Comme les symptômes observés en conditions naturelles sont généralement attribuables aux émissions globales d'une industrie plutôt qu'à un polluant en particulier, nous avons cherché à définir les symptômes permettant de diagnostiquer et d'évaluer les effets sur la végétation forestière de l'ensemble des émissions d'une industrie donnée.

Les symptômes de la toxicité des polluants atmosphériques n'étant pas très spécifiques, il est possible de les confondre avec les symptômes des stress provoqués par d'autres agents non polluants comme des conditions climatiques anormales, des carences minérales, des insectes ou des maladies. Ce guide est destiné principalement au personnel qui oeuvre sur le terrain et qui n'a aucune formation ou expérience spéciale en biologie de la pollution atmosphérique, afin de lui permettre de se familiariser avec les symptômes visibles des stress provoqués par des polluants atmosphériques sur la végétation forestière et ceux attribuables aux agents naturels, qui ont entre eux certaines similitudes.

S.S. Malhotra
R.A. Blauel

Preface

A wide variety of industrial operations in Alberta, Saskatchewan, Manitoba, and the Northwest Territories release considerable quantities of airborne emissions that can have a deleterious effect on surrounding forest vegetation. Such industries include natural gas processing plants, oil wells and refineries, oil sands plants, metal mines and smelters, cement plants, potash industry, pulp and paper mills, and agricultural chemical production and application. Some of the major pollutants from these operations are sulfur dioxide; oxides of nitrogen; hydrocarbons; heavy metals and particulates; dusts containing calcium, potassium, and sodium oxides; and salt water.

Visual symptoms of emission toxicity on vegetation are often the only basis for identifying and air pollution problem and assessing its magnitude. Under field conditions, symptom development on vegetation generally results from exposure to total emissions from and industry rather than to an individual pollutant. An attempt is made in this handbook to utilize the visual symptoms of air pollution toxicity to diagnose and assess the impact on forest vegetation of the total airborne emissions from a given industry.

The symptoms of air pollutant toxicity are not highly specific and can be confused with those caused by nonpollutant stresses such as abnormal climatic conditions, nutrient deficiencies, and insect and disease disorders. The main purpose of this handbook is to assist field personnel who lack formal training and experience in air pollution biology to become familiar with visible symptoms of airborne pollutants on forest vegetation and to acquaint them with certain similarities in symptom development by pollutant and nonpollutant stresses.

S.S. Malhotra
R.A. Blauel

Table des matières

Page

Introduction 1
Mode d'utilisation du guide 1
Mode de diagnostic des dommages causés par la pollution atmosphérique 3
Indices utiles 3

Végétation indemne 5
Conifères 5
Feuillus 5
Sous-étage 6
Lichens de la couverture vivante et lichens arboricoles 6

Stress provoqués par les agents naturels sur la végétation forestière 8
Facteurs climatiques 8
Sécheresse 8
Humidité excessive 10
Grêle 10
Température et lumière 10
Carences minérales 12
Maladies 14
Insectes 16
Conifères 16
Feuillus 17

Stress provoqués par les polluants sur la végétation forestière 18
Caractéristiques biologiques de la végétation 18
Nature des polluants, concentration et durée d'exposition 18
Conditions environnementales 18

Industrie du gaz naturel et du pétrole 19
Anhydride sulfureux 19
Phytotoxicité 19
Symptômes sur les conifères 22
Symptômes sur les feuillus 24
Hydrocarbures 25
Hydrocarbures liquides 25
Symptômes sur les conifères 25
Autres espèces de plantes dans les peuplements résineux 26
Symptômes sur les feuillus 26
Autres espèces de plantes dans les peuplements feuillus 28
Hydrocarbures gazeux 28
Émissions des charbonnages 30
Déversements d'eau salée 30
Phytotoxicité 32
Symptômes sur les conifères 32
Symptômes sur les feuillus 32
Autres espèces 33
Autres émissions 33
Soufre élémentaire 33
Fosses de brûlage et éruptions de puits . 34
Brouillards acides 34

Mines et fonderies de métaux 37
Phytotoxicité 37
Symptômes dans un peuplement d'épinettes . 37
Symptômes dans un peuplement de pins 38
Émissions de fluorures 40
Symptômes dans un peuplement feuillu 42
Émissions de fluorures 44
Bryophytes et lichens 44

Autres exploitations minières 45
Cimenteries 45
Industrie de la potasse 45
Tas de matières calcaires 46

Industrie des pâtes et papiers 48
Symptômes sur les lichens 48
Symptômes sur les conifères 50

Moteurs à combustion fixes 52
Oxydes d'azote 52
Ozone et pan 53

Industrie des produits chimiques agricoles ... 54
Vapeurs ammoniacales 54
Herbicides, stérilisants du sol et pesticides ... 54
Herbicides 56
Stérillisants du sol 58
Pesticides 58

Tableau synoptique des principaux effluents industriels et des symptômes visibles de leurs effets sur la végétation forestière 59

Remerciements 65

Glossaire 66

Annexes 69
1. Noms communs et noms scientifiques des plantes 70
2. Noms communs et noms scientifiques des maladies 71
3. Noms communs et noms scientifiques des insectes 71
4. Abréviations et noms chimiques 72

Index des polluants et des plantes 73

Figures

		Page
1	Carte des principales sources de pollution atmosphérique en Alberta, en Saskatchewan, au Manitoba et dans les Territoires du Nord-Ouest.	2
2 à 17	Végétation indemne. Stress provoqués par les agents naturels — Climat.	7
18 à 33	Symptômes des effets de la dessiccation hivernale, des inondations, de la sénescence naturelle, des gelées et de la température sur la végétation forestière.	9
34 à 47	Stress provoqués par les agents naturels — Carences minérales. Symptômes des carences en azote, en potassium, en phosphore, en fer et en soufre sur la végétation forestière.	11
48 à 62	Maladies. Symptômes de maladies sur la végétation forestière.	13
63 à 78	Stress provoqués par les agents naturels — Insectes. Symptômes des dommages causés par les insectes sur la végétation forestière.	15
79 à 94	Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'anhydride sulfureux sur les conifères.	21
95 à 110	Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'anhydride sulfureux sur les feuillus.	23
111 à 126	Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'hydrocarbures légers et d'hydrocarbures lourds sur les conifères.	27
127 à 142	Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'hydrocarbures légers et d'hydrocarbures lourds sur les feuillus.	29
143 à 158	Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des déversements d'eau salée sur la végétation forestière.	31
159 à 172	Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets d'autres sources d'émissions (soufre élémentaire, fosse de brûlage, éruption de puits et brouillard acide) sur la végétation forestière.	35
173 à 188	Stress provoqués par les polluants — Mines et fonderies de métaux. Symptômes des effets des émissions des fonderies de nickel, de cuivre et de zinc dans un peuplement d'épinettes.	39
189 à 204	Stress provoqués par les polluants — Mines et fonderies de métaux. Symptômes des effets des émissions des fonderies de nickel, de cuivre et de zinc dans un peuplement de pins.	41
205 à 220	Stress provoqués par les polluants — Mines et fonderies de métaux. Symptômes des effets des émissions des fonderies de nickel, de cuivre et de zinc dans une forêt feuillue.	43
221 à 234	Stress provoqués par les polluants — Autres exploitations de minerais. Symptômes des effets des poussières de ciment, des sels et des matières calcaires sur les essences forestières.	47
235 à 250	Stress provoqués par les polluants — Industrie des pâtes et papiers. Symptômes des effets des émissions de cette industrie sur la végétation forestière.	49
251 à 266	Stress provoqués par les polluants — Moteurs à combustion fixes et industrie des produits chimiques agricoles (ammoniac anhydre). Symptômes des effets des oxydes d'azote et des vapeurs ammoniacales sur les essences forestières.	51

267 à 278 Stress provoqués par les polluants — Industrie des produits chimiques agricoles (herbicides). Symptômes des effets du 2,4,5-T et du 2,4-D sur les essences forestières. 55

279 à 290 Stress provoqués par les polluants — Industrie des produits chimiques agricoles (stérilisants du sol et pesticides). Symptômes des effets de quatre stérilisants du sol (piclorame, bromacil, chlorate de sodium, amitrole) et du pesticide diméthoate sur les essences forestières. 57

Tableaux

1. Classement des essences de la forêt boréale selon leur sensibilité au SO_2. 20

2. Sensibilité des essences aux émissions salines de l'industrie de la potasse. 46

Introduction

Disséminées à travers l'Alberta, la Saskatchewan, le Manitoba et les Territoires du Nord-Ouest, se trouvent des industries d'extraction et de traitement des diverses ressources naturelles de cette vaste région. Au nombre de ces opérations industrielles on compte des usines de traitement du gaz naturel, des puits et raffineries de pétrole, des usines de traitement des sables pétrolifères, des mines et fonderies de métaux, des cimenteries, des mines et raffineries de potasse, des usines de pâtes et papiers et des installations de production et d'application de produits chimiques agricoles (fig. 1). Toutes ces industries rejettent dans l'atmosphère des polluants, comme l'anhydride sulfureux (SO_2), les oxydes d'azote (NO_X), l'ozone (O_3), les hydrocarbures et les métaux lourds, qui peuvent endommager la végétation forestière environnante.

Les symptômes visibles des effets de ces polluants sur la végétation ne sont généralement pas très spécifiques. De fait, ils peuvent ressembler beaucoup aux symptômes provoqués par des facteurs naturels dans la forêt. Par conséquent, dans les cas de dépérissement de la végétation d'une région, il est difficile de déterminer si la toxicité des polluants atmosphériques en est la cause.

Comme une grande partie du personnel sur le terrain ne possède ni formation ni expérience en matière de biologie de la pollution atmosphérique, ce guide devrait leur être d'une grande utilité pour reconnaître les symptômes visibles des polluants atmosphériques sur la végétation forestière et les distinguer des symptômes, souvent très semblables, provoqués par des facteurs naturels tels que des carences minérales, certaines conditions climatiques, des maladies et des insectes. On espère que les renseignements fournis sauront permettre à un fin observateur de reconnaître les causes possibles de dégradation de l'environnement. En cas de doute, il faudra recourir aux experts scientifiques des universités, des organismes gouvernementaux ou des sociétés d'experts-conseils.

Mode d'utilisation du guide

Puisque ce guide doit être utilisé sur le terrain, il diffère des autres manuels sur la symptomatologie de la pollution atmosphérique, par le fait qu'il décrit les effets de **l'ensemble des émissions** aériennes de chaque type d'industrie fonctionnant dans la région. Dans la nature la végétation développe des symptômes de réaction à l'ensemble des émissions d'une opération industrielle donnée et non à des polluants individuellement. Ainsi, les symptômes observés sur l'épinette autour d'une fonderie de métaux ou d'une usine de traitement du gaz naturel diffèrent, même si dans les deux cas le SO_2 est le principal polluant en cause. Dans le cas des fonderies, les effluents contiennent, en plus du SO_2, des particules de métaux lourds, et les deux ensemble produisent sur la végétation des effets différents de ceux du SO_2 seul. Presque toutes les photographies illustrant des symptômes attribuables à des polluants atmosphériques ont été prises sur le terrain. Seuls les symptômes dus aux carences minérales, au monoxyde d'azote et aux vapeurs ammoniacales ont été obtenus dans des conditions expérimentales au laboratoire.

La description des symptômes des polluants est présentée par industrie. Voici les principales activités considérées et leurs émissions:

traitement du gaz naturel et du pétrole — SO_2, hydrocarbures, eau salée, dioxyde d'azote, hydrogène sulfuré et petites quantités de métaux lourds et d'autres particules;

extraction et fusion de métaux — SO_2, métaux lourds (cuivre, zinc, nickel, cadmium, plomb) et autres particules;

fabrication de ciment — poussières renfermant des oxydes de calcium, de potassium et de sodium;

extraction et raffinage de la potasse — chlorures de potassium et de sodium;

fabrication des pâtes et papiers — gaz soufrés, méthylmercaptan, sulfure de diméthyle, hydroxyde de sodium et ammoniac;

moteurs à combustion fixes — oxydes d'azote, ozone, PAN, hydrocarbures, gaz soufrés et monoxyde de carbone;

fabrication et application de produits chimiques agricoles (engrais, herbicides, stérilisants du sol et pesticides) — vapeurs ammoniacales, 2,4-D, 2,4,5-T, piclorame, bromacil, chlorate de sodium, amitrole et diméthoate.

Lorsqu'on soupçonne que des polluants atmosphériques sont à l'origine de dommages à la végétation, il faut déterminer s'il existe une source d'émission dans la zone atteinte et consulter la partie consacrée à cette industrie dans le guide. Y sont décrits les symptômes observables chez les conifères et les feuillus et, s'il y a lieu, chez les lichens et les plantes de la couverture vivante. Pour une consultation rapide, un tableau synoptique des symptômes est présenté aux pages 00 à 00. On trouvera également aux dernières pages du guide un glossaire des termes techniques, des listes des noms communs et des noms scientifiques de plantes, de maladies et d'insectes, une liste d'abréviations et de noms chimiques ainsi qu'un index des polluants et des plantes.

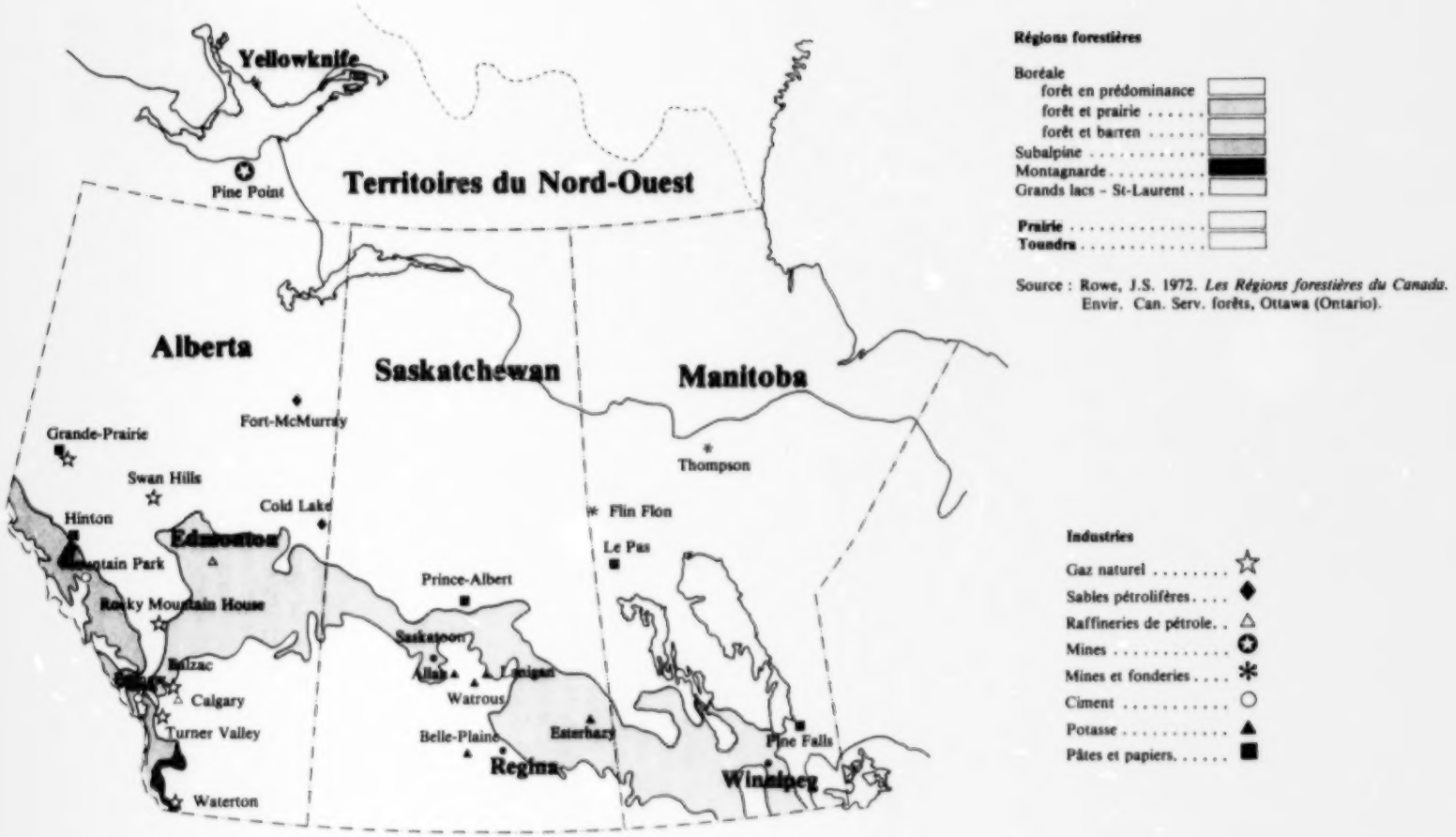


Figure 1. Carte des principales sources de poilution atmosphérique en Alberta, en Saskatchewan, au Manitoba et dans les Territoires du Nord-Ouest.

Comment diagnostiquer les dommages causés par la pollution atmosphérique

Il peut être parfois difficile de distinguer les symptômes causés par les polluants atmosphériques de ceux causés par les agents naturels. La relation des lésions non spécifiques observées ainsi que d'autres anomalies avec les polluants atmosphériques en cause exige une bonne connaissance de l'aire atteinte et beaucoup de circonspection.

1. Il faut en premier lieu établir les caractéristiques normales de la végétation indemne au voisinage de la zone en question pour comparaison avec la végétation atteinte.
2. Lorsqu'on soupçonne que des polluants atmosphériques sont en cause il faut vérifier l'existence d'une source de pollution de l'air dans la zone en jeu; obtenir des renseignements sur les types de polluants libérés dans l'atmosphère, leurs quantités et leurs sources; déterminer la hauteur de la cheminée; et s'informer s'il y a eu un mauvais fonctionnement du matériel antipollution.
3. On doit, lorsque c'est possible, obtenir des renseignements sur la qualité de l'air, les conditions météorologiques et la topographie afin de déterminer le mode de dissémination des polluants atmosphériques dans la région.
4. Il faut examiner les symptômes visibles de dommages sur diverses espèces de plantes, et les comparer avec les symptômes caractéristiques produits par des polluants particuliers ou par l'ensemble des émissions d'une industrie similaire, à l'aide de l'information et des illustrations présentées dans le guide. Il est préférable d'employer les mêmes espèces de plantes indicatrices dans toutes les zones atteintes.
5. Comme les symptômes dus à la pollution peuvent souvent être confondus avec ceux des stress provoqués par les facteurs naturels, il est important de tenir compte de facteurs tels que carences minérales du sol, conditions climatiques défavorables et troubles dus aux maladies et aux insectes. Les infestations d'insectes peuvent ordinairement être reconnues par la présence d'une de leurs formes de vie tandis que les maladies peuvent être confirmées par un examen microscopique.
6. Dans bien des cas, on peut vérifier qu'une lésion est due à la pollution atmosphérique au moyen d'une analyse chimique pour détecter la présence de polluants tels que le soufre, le fluorure et les métaux lourds dans la végétation atteinte. Il existe généralement une bonne corrélation entre la concentration de polluant et les symptômes observés sur la végétation. Les modifications de la chimie du sol et de sa teneur en polluants peuvent également fournir une bonne indication des effets de ceux-ci sur la végétation.

Indices utiles

1. Les lichens sont beaucoup plus sensibles à la pollution atmosphérique que les plantes vasculaires. Leur extrême sensibilité au SO_2 et aux oligo-éléments en font de précieux instruments biologiques de détection précoce et de surveillance des agressions de la végétation par la pollution atmosphérique. Les communautés d'hypnes, les lichens vivant sur les branches et le tronc des arbres ainsi que ceux poussant sur les surfaces rocheuses sont tous d'importants bioindicateurs. Exposés à des émissions industrielles telles que celles des usines de pâtes, des fonderies de métaux et des installations de traitement du pétrole et du gaz naturel, la plupart des lichens arboricoles commencent à montrer des symptômes de dégradation similaires à ceux causés par une détérioration naturelle. Aux endroits où l'air est pollué, les lichens sont plus rares, il n'en reste que quelques vestiges, et la répartition des espèces se modifie. Une analyse des lichens résiduels en vue de déterminer la présence d'éléments polluants est souvent utile pour diagnostiquer la nature des dommages observés.

   Les lichens encore intacts peuvent servir d'indicateurs de la pollution émanant des fonderies et aider à déterminer les zones polluées. On peut d'ailleurs prélever dans une zone indemne des lichens vivant en population homogène sur les branches, les transplanter à des distances de plus en plus grandes d'une source de pollution et en contrôler la vigueur, la densité, la diversité et la teneur en éléments polluants au fil du temps. Le rapport entre les changements mesurés et la distance de la source constitue une autre méthode efficace d'évaluation des agressions par la pollution atmosphérique chez la végétation et de détermination des zones touchées. Des photographies prises au moment de l'établissement de parcelles témoins puis à divers intervalles peuvent servir à comparer l'état de santé des lichens à plusieurs distances de la source de pollution.

2. En général, les symptômes sont plus évidents sur le côté des branches faisant face à la source des émissions.
3. Généralement, les symptômes d'agression par des polluants atmosphériques apparaissent beaucoup plus rapidement chez les feuillus que chez les conifères. Comme ils conservent longtemps leur feuillage, ces derniers, par contre, peuvent accumuler les polluants jusqu'à des niveaux toxiques et sont donc plus souvent sujets à des dommages mortels que les feuillus qui perdent leurs feuilles chaque année.
4. Les effets des polluants sur la végétation dépendent de nombreux facteurs : stade de développement de la plante, temps de l'année (dormance ou croissance active), effets synergiques, cumulatifs ou antagonistes possibles, conditions atmosphériques (température; humidité; vitesse et direction des vents), teneur en humidité et en éléments nutritifs du sol, période de la journée (échanges gazeux, ouverture des stomates), type de végétation (sensible ou tolérante), concentration des polluants et durée d'exposition.

Végétation indemne

Pour reconnaître les symptômes d'un stress quelconque originant soit d'agents naturels, soit de polluants atmosphériques, il est nécessaire en premier lieu de connaître les caractéristiques d'une végétation forestière normale. À remarquer, toutefois, qu'une végétation indemne ne sera pas toujours en tous points identique aux arbres, arbrisseaux et lichens illustrés, car l'âge du feuillage, le climat et les conditions édaphiques influent sur la couleur et la forme des feuilles. Un feuillage immature, par exemple, est généralement plus petit et a une couleur et une forme souvent différentes d'un feuillage mature. Normalement, la couleur des feuilles d'une espèce donnée à un endroit particulier devrait être assez uniforme. L'observateur doit établir les caractéristiques d'une végétation indemne pour chaque station.

Conifères

Le pin gris, le pin tordu latifolié, l'épinette blanche, l'épinette noire, le sapin baumier et le mélèze laricin sont les conifères les plus répandus dans la forêt boréale. Le **pin gris** et le **pin tordu latifolié** s'hybrident dans une partie de la forêt boréale couvrant le centre et le nord-ouest de l'Alberta. Comme les symptômes chez ces deux pins et leurs hybrides sont ordinairement très similaires, ces espèces sont traitées comme une seule. À l'état normal, à maturité, leurs aiguilles se trouvent réunies par paires, mesurent de 2,5 à 7,5 cm de long, ont une couleur vert foncé uniforme et sont droites ou courbées et parfois légèrement tordues (fig. 2 et 3). Elles restent normalement sur l'arbre de 3 à 5 ans.

L'**épinette blanche**, l'**épinette noire** et le **sapin baumier** ont des feuillages similaires. Les branches portent sur presque toute leur longueur des aiguilles isolées qui restent normalement sur l'arbre de 5 à 8 ans (fig. 4). À maturité, elles sont d'un vert foncé uniforme, droites ou légèrement courbées et ont une nervure médiane saillante (fig. 5). Celles des épinettes mesurent de 1,2 à 2,5 cm de long, et, étant à section quadrangulaire, roulent facilement entre les doigts, contrairement à celles du sapin baumier qui sont plates et ont, par ailleurs, de 2 à 3 cm de long. Pour distinguer une épinette noire d'une épinette blanche, le meilleur indice est le cône : chez l'épinette noire, il est ovale (2,5 cm de long) et reste sur l'arbre, tandis que chez l'épinette blanche, il est cylindrique (2,5 à 7,5 cm de long) et n'est présent sur l'arbre que du milieu de l'été au milieu de l'hiver. Sauf dans le Grand Nord, l'épinette noire se trouve ordinairement sur les terres humides et l'épinette blanche sur les hautes terres.

Le **mélèze laricin** est également abondant sur les basses terres. Ses aiguilles, groupées en faisceaux de 10 à 20, sont assez petites (environ 2,5 cm), minces et molles. De couleur vert pâle, elles jaunissent à l'automne et tombent.

Feuillus

Les feuillus les plus répandus sont le peuplier baumier, le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier. Les feuilles du **peuplier baumier** sont ovales, finement dentées et mesurent environ 7,5 à 12,5 cm de long. Leur face supérieure est d'un vert luisant, leur face inférieure, vert pâle et pratiquement sans poils. La forme, un peu moins ronde à la base que chez le peuplier faux-tremble, s'allonge graduellement pour se terminer en pointe au sommet (fig. 6).

Les feuilles matures du **peuplier faux-tremble** sont vert brillant au-dessus, vert pâle au-dessous et toujours sans poils. Le limbe, de forme circulaire, a un diamètre d'environ 4 à 5 cm, est finement denté et se termine brusquement en pointe. La queue (pétiole) est de section aplatie (fig. 7).

Le **bouleau à papier** a des feuilles de 7,5 cm de long, plus ou moins ovales, parfois triangulaires, et souvent à dents aiguës, doubles (fig. 8). À maturité, le dessus des feuilles est d'un vert brillant uniforme, tandis que le dessous est un peu pâle et garni de poils. L'écorce mature est d'un blanc caractéristique avec des lenticelles (marques horizontales) saillantes.

Sous-étage

Les espèces ligneuses et herbacées qui forment le sous-étage sont nombreuses et diverses. Le **saule** a des feuilles de 7,5 à 10 cm de long, relativement étroites (2,5 cm), ordinairement finement dentées et allongées aux deux bouts. Le dessus est généralement vert foncé, et le dessous, vert pâle (fig. 9). Les feuilles de l'**aulne vert d'Amérique**, qui ressemblent beaucoup à celles du bouleau à papier, sont ovales, presque rondes, et ont des dents assez aiguës. Le dessus est vert mat (fig. 10), et le dessous, blanchâtre. Le **cerisier de Virginie a** des feuilles ovales (7,5 à 10 cm de long), plus larges au milieu, effilées aux deux extrémités et finement dentées, chaque dent se terminant en une pointe droite, sans poils; leur face supérieure est vert mat.

Des photographies des feuillages normaux du **lédon du Groenland**, du **rosier aciculaire** et de l'**aralie à tige nue** sont présentées aux figures 11,12 et 13 respectivement.

Lichens de la couverture vivante et lichens arboricoles

La couverture vivante est constituée en majeure partie de lichens et de bryophytes. Les lichens des caribous (*Cladonia* et *Cladina*) prédominent chez les **lichens** du sol. On peut voir à la figure 14 une photographie de *Cladina alpestris*, lichen ubiquiste dans la forêt boréale, et à la figure 15 une photographie d'un large thalle de *Peltigera aphtosa*. Des lichens sont souvent présents sur les branches et le tronc des arbres (lichens corticoles)(fig. 17) et sur les surfaces rocheuses (lichens saxicoles). Les **bryophytes**, qui comprennent les mousses, dont les hypnes (fig. 16) et les hépatiques, sont très évidents et constituent normalement une partie très importante du tapis végétal.

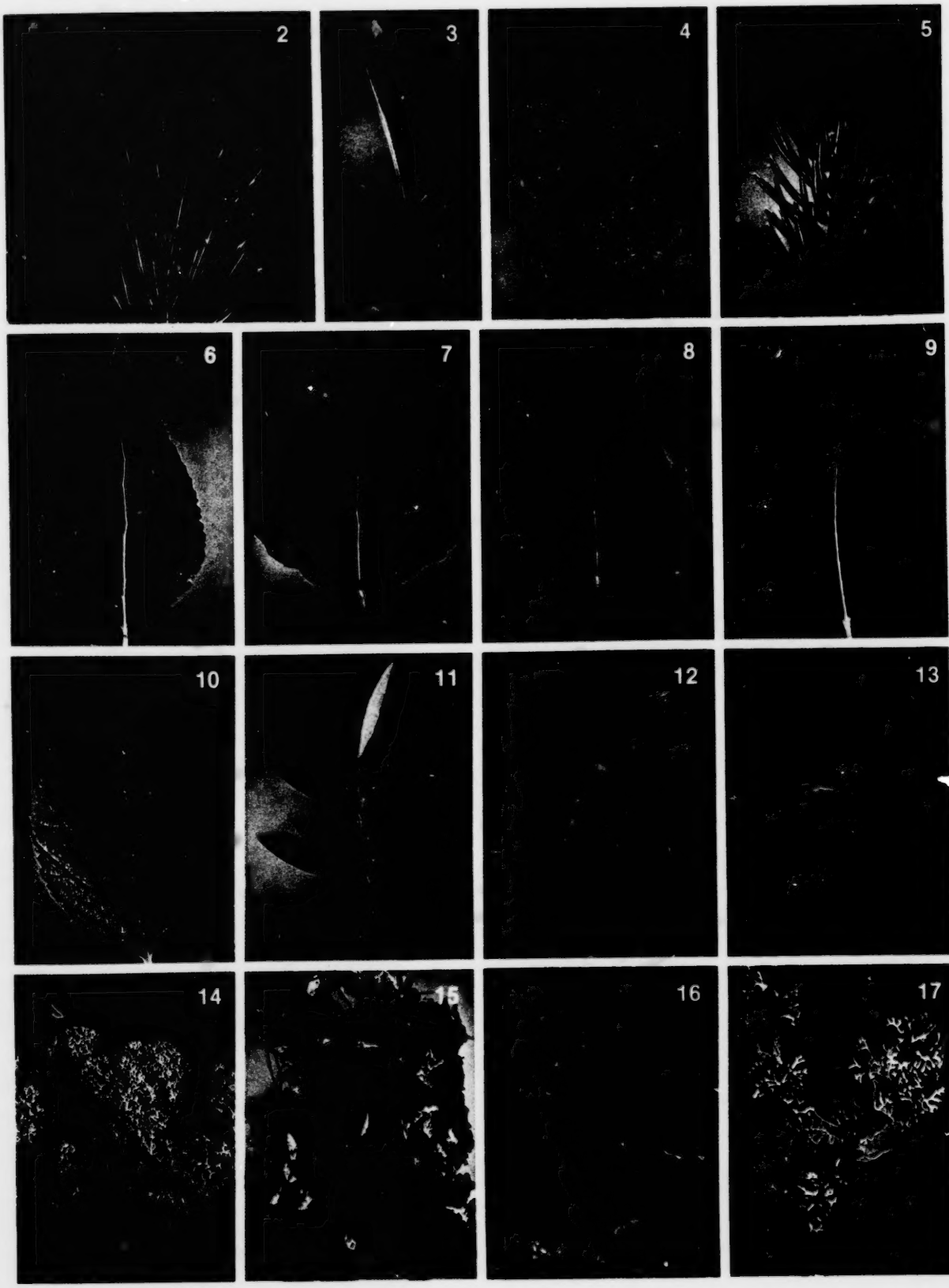
Lectures suggérées

Hosie, R.C. 1972. *Arbres indigènes du Canada.* Envir. Can. Serv. Can. forêts, Ottawa.

Moss., E.H. 1959. *Flora of Alberta.* Univ. of Toronto Press, Toronto.

Végétation indemne (fig. 2 à 17).

Fig. 2 Branche de pin. **Fig. 3** Gros plan des aiguilles du pin. **Fig. 4** Branche d'épinette blanche. **Fig. 5** Gros plan des aiguilles de l'épinette blanche. **Fig. 6** Face supérieure de la feuille du peuplier baumier. **Fig. 7** Face supérieure de la feuille du peuplier faux-tremble. **Fig. 8** Face supérieure de la feuille du bouleau à papier. **Fig. 9** Face supérieure de la feuille du saule. **Fig. 10** Face supérieure de la feuille de l'aulne vert d'Amérique. **Fig. 11** Feuillages de l'année et d'un an du lédon du Groenland. **Fig. 12** Rosier aciculaire. **Fig. 13** Aralie à tige nue. **Fig. 14** Lichen du sol : *Cladina alpestris.* **Fig. 15** Lichen du sol : *Peltigera aphthosa.* **Fig. 16** Hypnes du sol : *Pleurozium schreberi* principalement. **Fig. 17** Lichens arboricoles : *Bryoria* sp., *Hypogymnia physodes, Parmelia sulcata* et *Usnea* sp.


2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17

Stress provoqués par les agents naturels sur la végétation forestière

Les arbres et les plantes herbacées sont sujets à de nombreux stress infectieux ou non qui font partie intégrante de l'écosystème naturel. Beaucoup de ces stress provoquent des symptômes qui ressemblent à ceux que produisent les polluants atmosphériques. Pour diagnostiquer les effets des polluants sur une végétation forestière, il est donc nécessaire de savoir reconnaître et déterminer les effets des stress naturels. Sont décrits dans cette section quelques-uns des stress naturels les plus fréquents dont les symptômes visibles sont similaires à ceux que provoquent des polluants atmosphériques. Mais, tout comme les symptômes provoqués par des polluants peuvent ressembler à ceux des stress naturels, les symptômes de divers stress naturels peuvent aussi se ressembler. Nous avons essayé de fournir à l'observateur suffisamment de données pour qu'il puisse se faire un jugement valable quant à la cause de dommages à la végétation forestière, qu'il s'agisse de polluants ou de facteurs naturels.

Facteurs climatiques

L'alimentation en eau, la grêle, la température et la lumière sont des causes fréquentes de dommages ou de mortalité chez la végétation forestière. Les registres météorologiques et les rapports sur des phénomènes météorologiques spéciaux peuvent aider à bien diagnostiquer un incident d'origine climatique. Comme la topographie influe sur les effets des phénomènes climatiques, il est également nécessaire d'en tenir compte.

Sécheresse

Les périodes de précipitations faibles ou nulles peuvent entraîner une grave sécheresse. Les jeunes plantes sont les premières à présenter des symptômes, parce que leur système racinaire n'est pas suffisamment développé pour puiser l'eau des réserves plus profondes, ou que leur transpiration est beaucoup plus élevée que leur capacité d'absorption de l'eau. Chez les semis de conifères, le premier symptôme est le flétrissement du feuillage et des nouvelles pousses. Si le flétrissement est grave, il peut y avoir ensuite jaunissement général (chlorose), brunissement, nécrose (mort des tissus) et finalement mort du semis (fig. 18). Chez les feuillus, les effets sont similaires (fig. 19).

En hiver, durant les courtes périodes de hautes températures il se produit une transpiration excessive qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau par la tige et le système racinaire alors gelés, d'où ce qu'on appelle la dessiccation hivernale. Les bourgeons peuvent être gravement

---

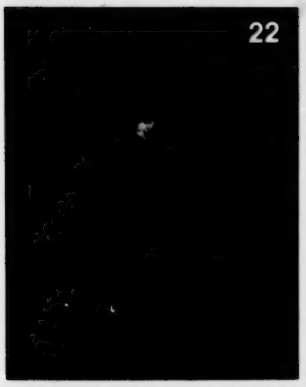
Stress provoqués par les agents naturels — Facteurs climatiques. Symptômes des effets de la sécheresse, de la dessiccation hivernale, des inondations, de la sénescence naturelle, des gelées et de la température sur la végétation forestière (fig. 18 à 33).

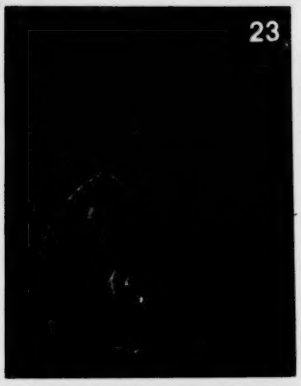
Sécheresse : Fig. 18 Brunissement rougeâtre des aiguilles d'un semis d'épinette blanche. **Fig. 19** Nécrose d'une feuille de peuplier. **Dessiccation hivernale : Fig. 20** Dommages aux bourgeons du peuplier faux-tremble. Le feuillage en touffes produit l'année suivante peut également être attribuable à des gelées. **Fig. 21** Pins tordus latifoliés atteints de rouge physiologique. **Inondation : Fig. 22** Vieillissement prématuré (sénescence) du feuillage du peuplier se trouvant à la limite d'un terrain humide couvert d'épinettes noires. **Sénescence naturelle : Fig. 23** Décoloration automnale des feuilles du peuplier faux-tremble avant leur chute. **Grêle : Fig. 24** Branches de pin endommagées d'un seul côté. **Gelées : Fig. 25** Premiers sypmtômes d'affaissement sur de nouvelles pousses de pin. **Fig. 26** Aiguilles endommagées d'une nouvelle pousse de pin. **Fig. 27** Nécrose partielle d'aiguilles de pin. **Fig. 28** Nouvelles pousses d'épinette blanche endommagées (jeunes aiguilles au stade final de la nécrose). **Fig. 29** Dessiccation et nécrose d'une feuille de peuplier faux-tremble. **Température : Fig. 30** Tacheture hivernale d'une branche de pin causée par la réflexion de la lumière solaire. **Fig. 31** Gros plan de la tacheture hivernale sur des aiguilles de pin. **Fig. 32** Brunissement du feuillage de l'épinette blanche causé par la chaleur provenant d'un feu de forêt à proximité. **Fig. 33** Blanchiment et brunissement du feuillage de l'épinette blanche causés par l'extrême chaleur d'un feu de forêt.

18

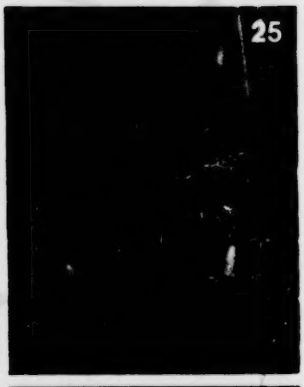
19

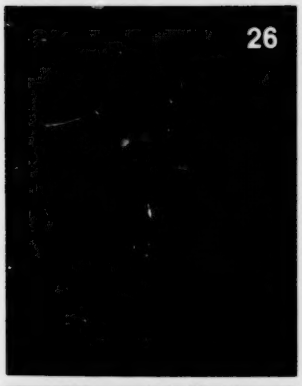
21

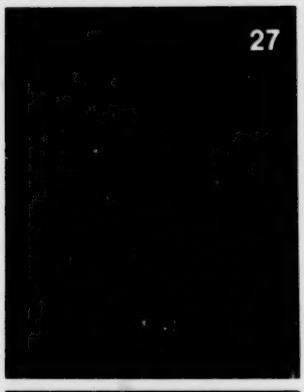

22

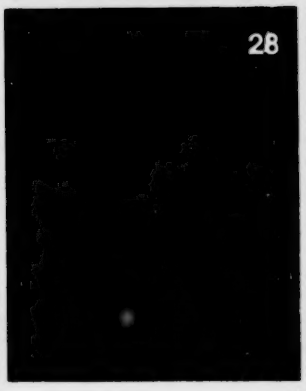

23

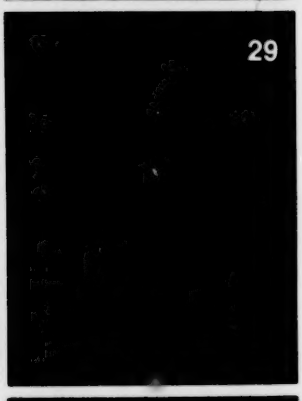
24


25

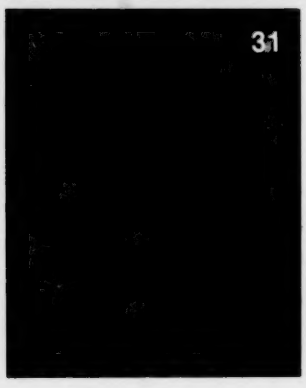

26


27

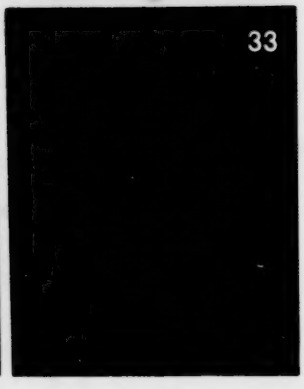

28


29

30


31

32


33

atteints, et il s'ensuit généralement une raréfaction du feuillage à la saison suivante de croissance (fig. 20). Les surfaces couvertes de conifères indigènes, qui offrent l'aspect d'une ceinture **rouge** (fig. 21), sont des exemples de la dessiccation hivernale causée par les vents chinooks dans les régions montagneuses, surtout sur les versants est des Rocheuses. Appelée rouge physiologique, cette affection est attribuable à des changements rapides et extrêmes de la température qui peut passer de moins de 0° C à 20° C, et affecte la plupart des conifères. Elle se caractérise par une coloration brun rougeâtre du feuillage qui tend à demeurer sur l'arbre car il n'y a pas eu formation d'une assise de séparation. Souvent, le cambium et les bourgeons meurent, et le développement foliaire n'est que partiel au cours de la saison suivante de croissance. Des cas de mortalité dus à des atteintes répétées par le rouge physiologique ont été signalés.

Humidité excessive

La majeure partie de la forêt boréale se trouve sur des sols mal drainés. Or, une humidité excessive peut provoquer de graves dommages (décoloration du feuillage) chez de nombreuses plantes forestières, en raison surtout de l'oxygénation insuffisante du système racinaire. Certaines essences comme l'épinette noire et le mélèze laricin peuvent tolérer une humidité excessive pendant une grande partie de l'année. Des feuillus se trouvant près de terres humides peuvent acquérir une tolérance aux inondations, mais la sénescence foliaire tend à être précoce lorsque le niveau de l'eau demeure élevé pendant tout l'été (fig. 22). Les symptômes foliaires produits par les inondations ressemblent à ceux de la sénescence automnale (fig. 23). Lorsque les inondations durent plusieurs saisons, les arbres meurent.

Grêle

La grêle peut endommager les forêts en causant des lésions de la tige, des bris de cimes et de branches de même que des défoliations (fig. 2). On peut ordinairement diagnostiquer ce genre de dommages par le fait qu'ils sont situés du même côté sur les tiges ou les branches; d'ailleurs, la route de la tempête se voit facilement des airs. Les feuilles et branches endommagées fournissent un terrain propice aux infections. Les graves orages de grêle peuvent tuer des arbres.

Température et lumière

Les fluctuations extrêmes ou rapides de la température provoquent souvent des dommages dans les forêts. C'est à la fin du printemps et de l'été que se produisent la majorité des gelures des feuilles, des bourgeons et des pousses. Chez les conifères, le flétrissement du jeune feuillage est le premier symptôme (fig. 25) provoqué par une gelée tardive au printemps. Il est généralement suivi d'altération de la couleur des tissus et de nécrose (fig. 26 à 28). Le feuillage touffu du peuplier faux-tremble peut être causé par la dessiccation hivernale (fig. 20), mais aussi par le gel, surtout le long des contreforts des Rocheuses. En hiver, les basses températures peuvent provoquer

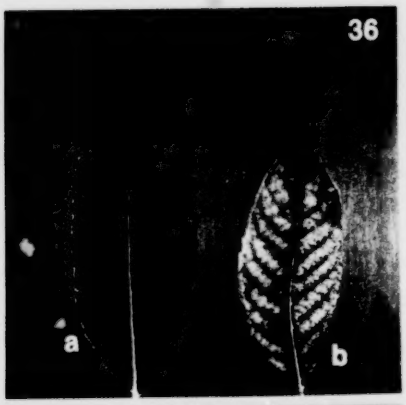
---

Stress provoqués par les agents naturels — Carences minérales. Symptômes des carences en azote, en potassium, en phosphore, en fer et en soufre sur la végétation forestière (fig. 34 à 47). Remarque : Exception faite de la figure 45, tous les symptômes foliaires illustrés sur cete planche se sont produits sur des plantes cultivées en serre dans des conditions contrôlées.

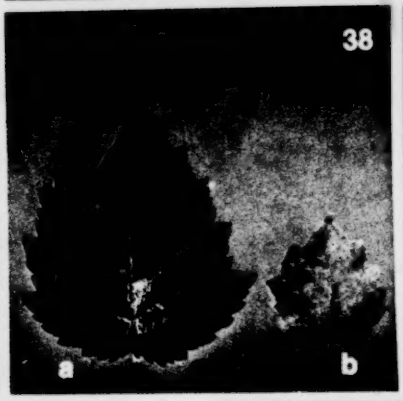
Carence en azote : Fig. 34 Semis d'épinette blanche : (a) état normal (croissance et coloration), (b) carence en azote. **Fig. 35** Chlorose chez l'épinette blanche. **Fig. 36** Feuilles de saule : (a) état normal (croissance et coloration), (b) carence en azote. **Fig. 37** Agrandissement de la figure 36(b) montrant la chlorose de la feuille. **Fig. 38** Feuilles de bouleau : (a) état normal (croissance et coloration), (b) carence en azote. **Fig. 39** Agrandissement de la figure 38(b) montrant la coloration anormale de la feuille. **Carence en potassium : Fig. 40** Aiguilles de pin : (a) état normal (croissance et coloration), (b) carence en potassium. **Fig. 41** Rabougrissement, torsion et chlorose d'une nouvelle pousse foliaire de peuplier. **Fig. 42** Blanchiment d'une feuille de bouleau. **Carence en phosphore : Fig. 43** Croissance irrégulière et coloration anormale d'une feuille de bouleau. **Carence en fer : Fig. 44** Jaunissement d'une nouvelle pousse de pin. **Fig. 45** Rabougrissement et coloration anormale des aiguilles d'un semis de pin, causés par une carence multiple en azote, en potassium et en phosphore. **Carence en soufre : Fig. 46** Chlorose d'une feuille de saule. **Fig. 47** Légère chlorose d'une feuille de bouleau.

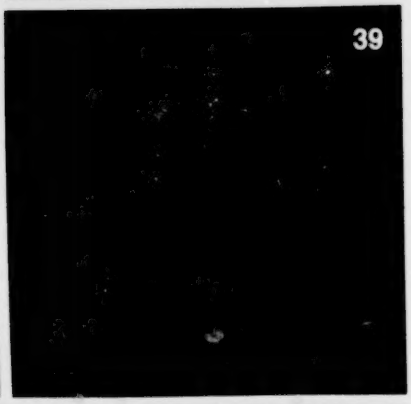
34

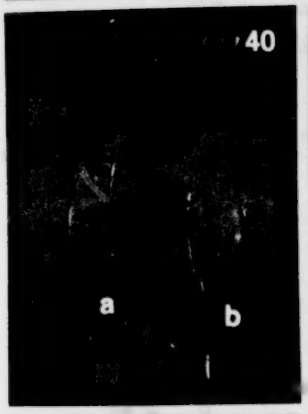
35


36
a
b

37


38
a
b


39

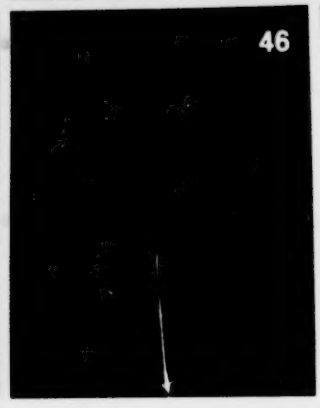

40
a
b

42

43

44

45


46

47

des gelivures (éclatement du bois) de la tige principale.

Chez les feuillus, les symptômes de gelure apparaissent d'abord sur les bords des feuilles et s'étendent progressivement vers le centre. La nécrose des tissus progresse rapidement, la période de chlorose étant de courte durée (fig. 29).

Des températures élevées combinées à une exposition à un soleil vif peuvent provoquer des défoliations, des brûlures des feuilles et des insolations (au niveau de l'écorce). On observe ce genre de dommages là où des peuplements ont été ouverts récemment, le long de routes ou de limites de coupe. La réflexion de la lumière solaire est considérée come responsable de la tacheture hivernale du feuillage des conifères (fig. 30 et 31).

Le brunissement et le blanchiment des feuilles dus aux températures élevées des feux de forêt (fig. 32 et 33) ressemblent parfois aux symptômes provoqués par des polluants atmosphériques. La présence de traces de feux ou de bois carbonisés près de la végétation atteinte permet d'attribuer la cause à un incendie.

Lectures suggérées

Kramer, P.J. & T.T. Kozlowski, 1960. *Physiology of trees.* McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ont.

Linzon, S.N. 1962. Hail damage to white pine and other trees. *Forestry Chronicle* 38 : 497-504

Robins, J.K. & J.P. Susut. 1974. *Red belt in Alberta* Envir. Can. Serv. can. forêts, Centre rech. for. Nord, Edmonton (Alb.) Rapp. d'inf. NOR-X-99.

Zalasky, H. 1976. Frost damage in poplar on the prairies. *Forestry Chronicle* 52 : 61-64.

Carences minérales

Les carences minérales sont fréquentes en forêt. Plusieurs facteurs peuvent nuire à l'absorption et à l'utilisation des éléments nutritifs par les plantes : (1) l'absence d'éléments nutritifs sous une forme assimilable, (2) un défaut d'aération du sol, (3) une modification du pH du sol altérant la solubilité des éléments nutritifs, (4) un manque d'humidité du sol et (5) une activité microbienne insuffisante pour assurer le renouvellement des éléments nutritifs.

En général, les carences minérales sont difficiles à déceler, car les symptômes ne sont pas spécifiques. Certains symptômes, comme une réduction de la croissance et une légère décoloration du feuillage, ne sont pas facilement reconnaissables. Lorsqu'une carence est soupçonnée, il est recommandé d'effectuer une analyse chimique du feuillage et du sol afin de confirmer le diagnostic.

Chez les conifères, une **carence en azote** peut causer le rabougrissement et la chlorose des aiguilles (fig. 34 et 35). Chez des feuillus comme le saule et le bouleau, elle produit également la réduction de la croissance des feuilles ainsi que la chlorose (fig. 36 à 39).

Les symptômes d'une **carence en potassium** chez les conifères apparaissent d'abord sur le jeune feuillage. Les pousses nouvelles sont rabougries et semblent accuser une déficience de la fonction chlorophyllienne (fig. 40). De même, chez les feuillus, une carence en potassium entraîne le rabougrissement, la torsion des feuilles et une légère chlorose ou le blanchiment (fig. 41 et 42).

Stress provoqués par les agents naturels — Maladies. Symptômes de maladies sur la végétation forestière (fig. 48 à 62).

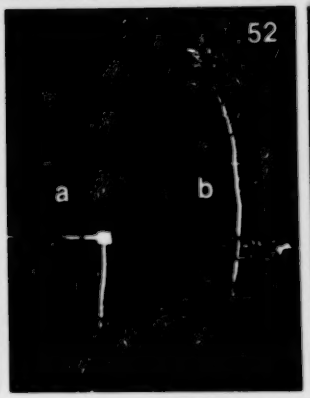
Fig. 48 Sur une épinette noire, décoloration et chute d'aiguilles causées par la brûlure printanière. Seules les branches recouvertes de neige en hiver sont attaquées. **Fig. 49** Infections dues à un rouge sur le vieux feuillage d'une épinette blanche. **Fig. 50** Chez l'épinette blanche, décoloration du feuillage de l'année causée par une rouille des aiguilles. **Fig. 51** Gros plan des pustules causées par la rouille des aiguilles chez l'épinette blanche. **Fig. 52** Semis de pin : (a) état normal; (b) infecté par le rouge dû a *Elytroderma*. **Fig. 53** Rouge causé par *Elytroderma* attaquant seulement les aiguilles d'un an du pin. **Fig. 54** Fructifications noires du rouge causé pas *Elytroderma* sur des aiguilles de pin. **Fig. 55** Rouille-balai de sorcière sur une épinette blanche, causée par un faux gui. **Fig. 56** Lésions causées par la rouille des feuilles du bouleau. **Fig. 57** Pustules de la rouille des feuilles du saule sur la face inférieure d'une feuille. **Fig. 58** Tache des feuilles chez le peuplier. **Fig. 59** Décoloration, noircissement et recourbement caractéristique des feuilles du peuplier faux-tremble, causés par une brûlure des pousses. **Fig. 60** Feuillage chlorotique du pin attribuable au pourridié-agaric. **Fig. 61** Infection du système racinaire par le pourridié-agaric. On peut voir le feutre mycélien de couleur blanche qui empêche le transport normal des éléments nutritifs jusqu'au feuillage. **Fig. 62** Dépérissement terminal d'un peuplement de bouleau causé par une maladie des racines inconnue.

48

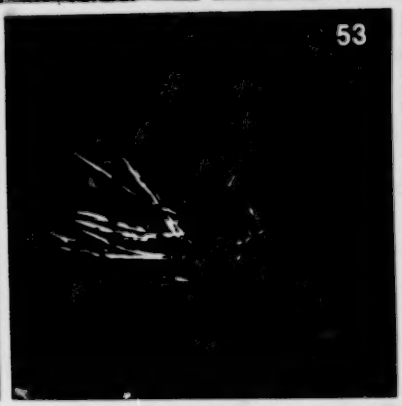
49

50

51



52


53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

Une **carence en phosphore** entraîne le rabougrissement et ralentit le développement du feuillage également. Chez les plantes à feuilles décidues, elle provoque souvent la variégation (fig. 43) ainsi que d'autres carences minérales. Toutefois l'intensité de la décoloration est ordinairement difficile à déceler.

La **carence en fer** est généralement peu courante dans la forêt boréale. Elle produit des symptômes chlorotiques sur le jeune feuillage (fig. 44).

Les carences multiples en azote, phosphore et potassium ne sont pas rares (fig. 45). Les symptômes, qui peuvent ressembler à ceux de chacune de ces carences s'observent surtout chez les jeunes semis ou sur les tissus en croissance active.

Une **carence en soufre** provoque chez les conifères la réduction de la croissance des aiguilles ainsi qu'une chlorose intense, et chez les feuillus, le rabougrissement ainsi qu'une chlorose marginale et internervaire (fig. 46 et 47).

D'autres microéléments comme le cuivre, le manganèse, le molybdène, le zinc et le bore sont ordinairement disponibles en quantités suffisantes. Dans le cas du **bore**, il y a peut-être lieu de souligner que sa carence peut provoquer chez les arbres forestiers la formation de rosettes des bourgeons et des dommages à l'extrémité de la tige.

Lectures suggérées

Hacskaylo, J., R.F. Finn & J.P. Vimmerstedt. 1969. *Deficiency symptoms of some forest trees.* Ohio Agricultural Research and development Centre. Wooster, Ohio, Research Bulletin 101.

Treshow, M. 1970. *Environment and plant response.* McGraw-Hill Book Co., Toronto.

Maladies

De nombreuses maladies ont des symptômes physiques similaires à ceux de certains polluants atmosphériques. En forêt, les champignons pathogènes causent la plupart des maladies infectieuses des plantes. Les attaques par les nématodes, les bactéries, les virus et certaines plantes supérieures comme le faux gui ont une importance moindre. Nous ne donnons ici qu'un bref aperçu des maladies des arbres et des arbrisseaux pour montrer la variété des organismes en cause et des symptômes. Pour obtenir plus de détails, on pourra consulter d'autres ouvrages, tels que ceux énumérés dans les lectures suggérées. Le diagnostic de la plupart des maladies est établi d'après les symptômes morbides relevés sur les feuilles et par un examen microscopique pour vérifier la présence des pathogènes.

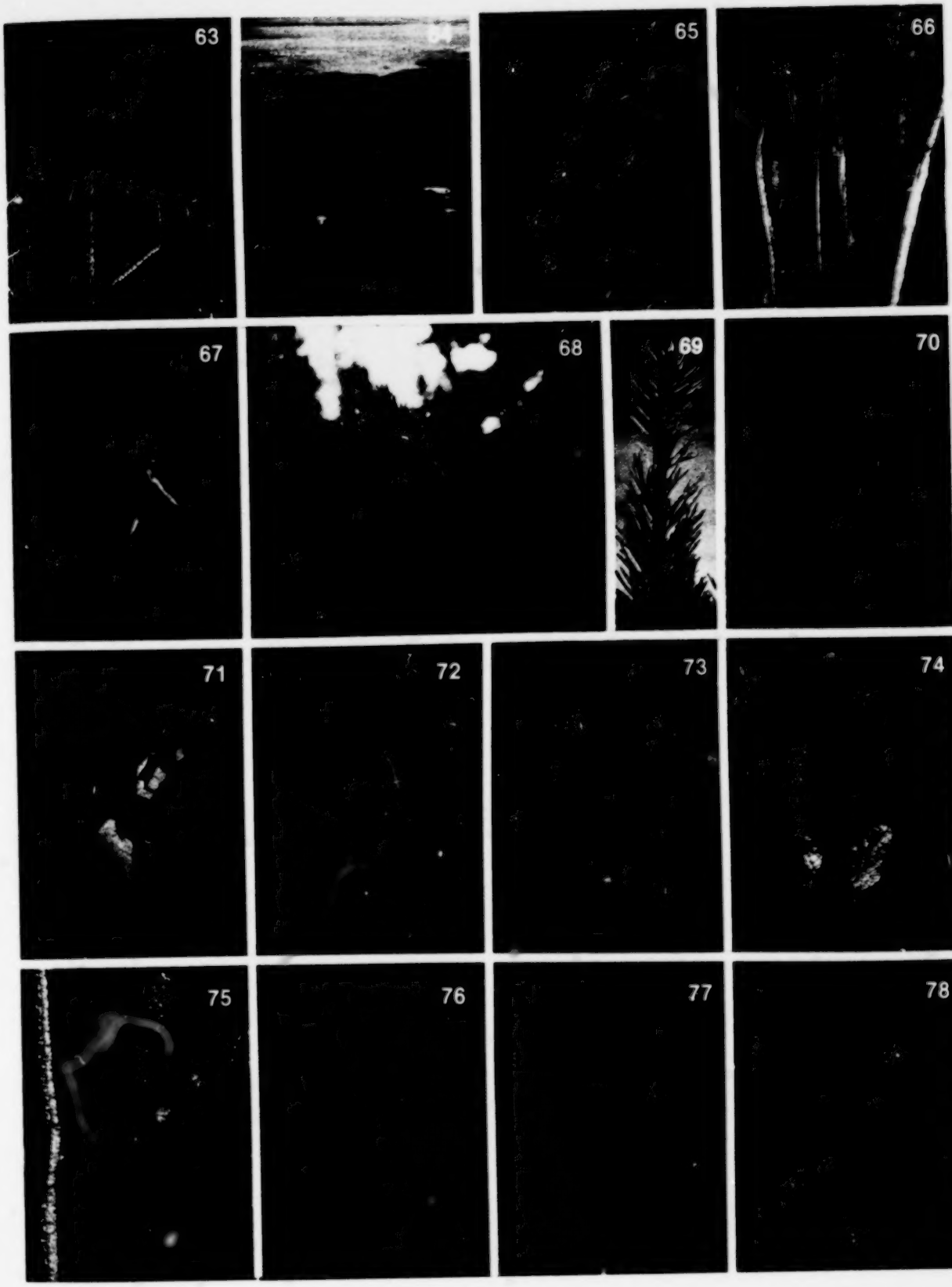
Chez les conifères, la **brûlure printanière** (fig. 48), le **rouge** (fig. 49) et la **rouille des aiguilles** (fig. 50) se traduisent par des lésions et une décoloration du feuillage, qui ressemblent aux effets des métaux lourds, puis la chute prématurée des aiguilles. Les champignons en cause se trouvent dans les tissus des aiguilles sous forme d'hyphes et, parfois, de pustules (fig. 51).

Certaines maladies foliaires ont une incidence générale, envahissant le cambium et les tissus apicaux et causant de graves dommages aux arbres en croissance active. Dans la forêt boréale, les principales infections à incidence générale sont causées par *Elytroderma* et par le **faux gui**. Le rouge causé par *Elytroderma* chez le pin est une infection fongique qui déforme la tige et tue les aiguilles (fig. 52 à 54). Le faux gui est un parasite

---

Stress provoqués par les agents naturels — Insectes. Symptômes de dommages causés par des insectes sur la végétation forestière (fig. 63 à 78).

Fig. 63 Défoliation de l'épinette blanche causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. **Fig. 64** Vue aérienne des dommages infligés à des pins par la tordeuse du pin gris. **Fig. 65** Gros plan des dommages causés au pin par la tordeuse du pin gris. **Fig. 66** Trous d'entrée de *Colestechnites starki* (Free.) et dommages chez le pin. **Fig. 67** Dégâts de la mineuse de l'épinette sur une épinette blanche. **Fig. 68** Flétrissement des aiguilles de l'épinette blanche causé par le charançon du pin blanc. **Fig. 69** Aiguilles de pin en train de mourir par suite d'une attaque du charançon du pin tordu. **Fig. 70** Toile et dégâts du tétranyque de l'épinette sur l'épinette blanche. **Fig. 71** Dégâts d'un défoliateur inconnu sur une feuille de bouleau. **Fig. 72** Dégâts de la tenthrède-mineuse de Thomson sur une feuille de bouleau. **Fig. 73** Dégâts de la chrysomèle du liard sur une feuille de peuplier faux-tremble. **Fig. 74** Dégâts d'une mineuse sur une feuille de saule. **Fig. 75** Dommages résultant de l'alimentation ou de la ponte d'un insecte sur une feuille de saule. **Fig. 76** Dégâts d'une mineuse des feuilles sur une feuille de bouleau. **Fig. 77** Feuille de peuplier faux-tremble enroulée et « squelettisée » par l'enrouleuse hâtive du tremble. **Fig. 78** Dommages fort probablement causés par un phytopte *(Eriophyes)* sur une feuille de saule.


63
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78

du pin (et parfois de l'épinette) qui pénètre par les aiguilles et envahit l'écorce et le cambium. Beaucoup d'arbres infectés produisent des structures touffues ou ressemblant à des balais, qui procurent au faux gui un support, l'eau et la plupart de ses besoins en éléments nutritifs (fig. 55).

Chez les feuillus, certaines maladies infectieuses se manifestent également par des symptômes qui peuvent être pris pour des effets de polluants. Les **rouilles** produisent généralement un jaunissement des feuilles infectées, qui conduit à une sénescence précoce (fig. 56 et 57).

D'autre maladies très diverses telles que les taches des feuilles, les **brûlures des pousses** et les **blancs**, attaquent les feuilles des arbres (fig. 58 et 59. Les symptômes vont de taches de couleur anormale et de forme irrégulière jusqu'à la nécrose complète. Après un printemps humide, les brûlures des pousses peuvent être fréquentes, les symptômes en étant le flétrissement et le noircissement de la nouvelle pousse encore tendre (fig. 59).

Certaines **maladies des racines** peuvent produire des symptômes foliaires qui ressemblent un peu à ceux qu'induisent des polluants atmosphériques. Chez les conifères, l'altération de la couleur du feuillage est généralement le premier symptôme visible du **pourridié agaric** (fig. 60), suivi par le flétrissement, la dessiccation et la nécrose qui sont dus à la réduction du transport de l'eau et des éléments nutritifs du système racinaire à la cime. Une résinose et une carie sont souvent visibles à l'examen du collet (fig. 61). Chez les feuillus, les symptômes des maladies des racines commencent souvent par un dépérissement graduel du feuillage et des branches supérieures, qui s'étend progressivement vers le bas jusqu'à ce que l'arbre tout entier meure (fig. 62).

Lectures suggérées

Bega, R.V. 1978. *Diseases of Pacific coast conifers.* United States Department of Agriculture, Forest Service. Agriculture Handbook 521.

Boyce, J.S. 1961. *Forest pathology.* McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ont.

Peterson, G.W. & R.S. Smith, Jr. 1975. *Forest nursery diseases in the United States.* United States Department of Agriculture, Forest Service. Agriculture Handbook 470.

Ziller, W.C. 1974. *The tree rusts of western Canada.* Environment Canada, Canadian Forestry Service. Ottawa, Ont. Publication 1329.

Insectes

La présence d'une des diverses formes de vie des insectes permet de distinguer leurs dommages de ceux des polluants. Le seul problème consiste dans la difficulté de déceler certaines de ces formes. En général, toutefois, les insectes ne sortent pas de l'aire connue des hôtes qu'ils attaquent, et certains se limitent à un hôte spécifique ou à un groupe d'hôtes.

Conifères

La défoliation des conifères est typique des ravages causés par des insectes comme la **tordeuse des bourgeons de l'épinette** (fig. 63), la **tordeuse du pin gris** (fig. 64 et 65) ainsi que divers **diprions et tenthrèdes** qui attaquent le pin, l'épinette, le mélèze laricin et le sapin baumier. Les aiguilles partiellement dévorées laissées par ces insectes aident à établir le diagnostic. Le pin et l'épinette sont souvent attaqués par des **mineuses** (fig. 66 et 67) qui pénètrent dans les aiguilles pour se nourrir des tissus internes succulents. Les trous d'entrée et de sortie des larves, les aiguilles minées et la présence de larves sont des indices révélateurs.

La pousse apicale de l'épinette et du pin est annelée et tuée par les larve des **charançons** (fig. 68 et 69) qui y creusent des galeries. Les **cécidomyies** et les **perce-pousses** (diprions ou tenthrèdes) peuvent également causer des dommages aux bourgeons et aux pousses.

Le **tétranyque de l'épinette**, à peine visible à l'oeil nu, peut causer de graves dommages au feuillage de l'épinette en suçant les sucs des tissus des aiguilles. Lorsqu'il pullule, sa présence se manifeste également pas une toile soyeuse et le jaunissement des aiguilles (fig. 70).

Feuillus

Chez les feuillus, une grande variété d'insectes peuvent causer des dommages allant de feuilles partiellement dévorées (fig. 71) jusqu'à la défoliation totale par des insectes aussi connus que la **livrée des forêts.** Diverses **mineuses** et **squelletteuses des feuilles** sont également répandues (fig. 72 à 77).

Certaines mineuses peuvent causer des pustules allant du vert au brun sur les feuilles (fig. 72, 74 et 75), tandis que d'autres laissent une trace étroite à mesure qu'elles dévorent l'intérieur de la feuille (fig. 76). Certaines **enrouleuses**, comme leur nom l'indique, enroulent la feuille et la maintiennent en position courbée avec de la soie, de façon à se pourvoir d'une gaine protectrice à l'intérieur de laquelle elles s'alimentent et se reposent (fig. 77). Les **galles** sur les feuilles, les bourgeons et les pousses sont un autre signe fréquent des dégâts des insectes. Ces excroissances anormales ont diverses formes, tailles et couleurs. Comme les insectes producteurs de galles sont très spécialisés, chaque espèce produit une galle caractéristique (fig. 78) selon ses habitudes alimentaires et ses sécrétions.

Certains **scolytes de l'écorce** et **perceurs du bois** limitent leurs attaques à l'écorce, au cambium et à la couche externe de l'aubier tandis que d'autres peuvent pénétrer profondément dans le bois. Ils servent ainsi de vecteurs à des champignons, bactéries ou virus pathogènes. Le **dendroctone du pin ponderosa** et le champignon du bleuissement avec lequel il est associé constituent un exemple d'une relation complexe insecte-champignon, mortelle pour le pin hôte (Safranyik *et al.*, 1974). La **maladie hollandaise de l'orme** est causée par un champignon dont les spores sont ordinairement transportées aux ormes d'Amérique sains par deux scolytes répandus en Amérique du Nord. Les symptômes de la maladie sont le flétrissement suivi du jaunissement, de la mort des branches et finalement de l'arbre entier.

Lectures suggérées

Furniss, R.L. & V.M. Carolin. 1977. *Western forest insects.* United States Department of Agriculture, Forest Service. Miscellaneous Publication 1339.

Johnson, W.T. & H.H. Lyon. 1976. *Insects that feed on trees and shrubs.* An illustrated practical guide. Cornell University Press. Ithaca, New York.

Rose, A.H. & O.H. Lindquist. 1973. *Insectes des pins de l'est du Canada.* Environnement Canada, Service canadien des forêts. Ottawa (Ontario). Publication 1313F.

Rose, A.H. & O.H. Lindquist. 1977. *Insectes des épinettes, du sapin et de la pruche de l'est du Canada.* Environnement Canada, Service canadien des forêts. Ottawa (Ontario). Rapport technique de foresterie 23F.

Safranyik, L., D.M. Shrimpton & H.S. Whitney. 1974. *Management of lodgepole pine to reduce losses from the mountain pine beetle.* Environment Canada, Canadian Forestry Service. Ottawa, Ontario. Forestry Technical Report 1.

Stress provoqués par les polluants sur la végétation forestière

Lorsqu'un polluant atmosphérique quelconque vient en contact avec la végétation forestière, un certain nombre de facteurs interviennent pour en déterminer les effets sur la végétation. Ces effets sont très variés et dépendent des interactions des caractéristiques biologiques des espèces végétales, de la nature du polluant et des conditions environnementales.

Caractéristiques biologiques de la végétation

La tolérance ou sensibilité de la végétation aux polluants dépend des facteurs suivants : (1) constitution génétique; (2) âge, santé, vigueur et état du métabolisme; et (3) rythmes d'absorption et d'accumulation des polluants qui varient selon les caractéristiques morphologiques et anatomiques des espèces. Les différences de sensibilité entre les plantes peuvent être attribuables à des différences dans leur constitution génétique, laquelle détermine la tolérance biochimique et physiologique aux polluants. La sensibilité peut également varier selon le stade de développement du feuillage. Ainsi, les vieilles aiguilles de pin gris sont plus sensibles à des concentrations chroniques de SO_2 que les jeunes aiguilles complètement développées, mais moins sensibles que les nouvelles pousses immatures (tendres). Les jeunes aiguilles entièrement développées ont une activité métabolique élevée qui leur permet d'assimiler plus de SO_2 que les vieilles aiguilles. Un polluant devient toxique lorsque la quantité accumulée dans les tissus dépasse un certain niveau.

Nature des polluants, concentration et durée d'exposition

La nature d'un polluant est déterminée par ses caractéristiques chimiques, sa persistance et la phytotoxicité de ses transformations chimiques éventuelles. Son action sur la végétation dépend de sa concentration et de la durée d'exposition.

Les fortes concentrations de polluants ont souvent un effet immédiat et aigu dont certains symptômes sont facilement reconnaissables. Par contre, les faibles concentrations produisent des effets plus subtils ou chroniques, qui sont graduels et non pas toujours très évidents. D'autre part, la végétation peut réagir de façon individuelle ou globale. Une réaction individuelle est généralement causée par de faibles concentrations de polluants, tandis qu'une réaction globale est attribuable à des concentrations toxiques. Lorsque plusieurs polluants sont présents, comme cela se passe en conditions réelles, leur action peut être synergique, cumulative ou antagoniste.

Conditions environnementales

Un certain nombre de facteurs environnementaux tels que la température ambiante, l'humidité relative, l'humidité du sol, la disponibilité en éléments nutritifs et l'époque de l'année influent sur la réaction des plantes aux polluants atmosphériques. En général, c'est lorsque les conditions sont le plus favorables à leur croissance que les plantes sont le plus sensibles à la pollution atmosphérique; en hiver, lorsqu'elles sont en état de dormance, les dommages sont minimes. D'autres facteurs comme la direction et la vitesse des vents ainsi que les inversions de température sont importants, car ils déterminent la dispersion et la dilution des polluants de même que la réceptivité de la forêt.

Une végétation déjà affaiblie par des stress tels que des conditions climatiques défavorables, une carence minérale, une maladie ou des insectes, réagit à la pollution atmosphérique beaucoup plus rapidement et gravement qu'une végétation indemne. Une végétation soumise à un stress préalablement à une pollution atmosphérique, même de faible intensité, peut se trouver dépourvue d'un mécanisme de défense adéquat pour se protéger contre une telle agression.

Industrie du gaz naturel et du pétrole

Comme les gisements de combustibles fossiles renferment souvent de grandes quantités de soufre, leur traitement et leur raffinage pour l'obtention du gaz naturel et des produits pétroliers donnent lieu à des effluences renfermant des quantités considérables de composés qui peuvent être nocifs. Les usines de traitement des sables bitumineux et autres installations de l'industrie pétrolière émettent principalement de l'anhydride sulfureux, des oxydes d'azote et de faibles quantités de composés organiques, de métaux lourds et de matières particulaires. L'anhydride sulfureux est aussi le principal polluant des émissions des installations de traitement du gaz naturel, qui contiennent également de petites quantités d'hydrocarbures, d'oxydes d'azote et d'hydrogène sulfuré.

En général, les installations de traitement du gaz naturel transforment les composés soufrés en soufre élémentaire ou en acide sulfurique avec plus ou moins d'efficacité. Suivant la teneur originale en composés soufrés et l'efficacité du procédé de désulfuration, des quantités variables de SO_2 sont émises de façon continuelle dans l'environnement. De grandes quantités de ce polluant peuvent également être libérées à l'occasion de diverses activités industrielles ou d'accidents tels que brûlage d'urgence à la torche, panne du matériel de désulfuration, incendie du soufre élémentaire et éruption de puits de gaz ou de pétrole donnant lieu à un incendie.

Anhydride sulfureux

L'anhydride sulfureux est le principal polluant atmosphérique de l'industrie du pétrole et du gaz, et il produit à lui seul une série de symptômes bien définis sur les essences forestières. Beaucoup des photographies des symptômes provoqués par le SO_2 représentent des plantes affectées par des incidents résultant de blocs de soufre où le SO_2 était le seul polluant émis.

L'anhydride sulfureux, qu'il soit à l'état gazeux ou sous l'une de ses formes oxydées (sulfite ou sulfate), est extrêmement soluble dans l'eau. Il semblerait qu'il ne soit phytotoxique qu'en solution dans l'eau. Récemment, il a été suggéré que, dans des conditions d'humidité données, le SO_2 dissous mais non dissocié serait probablement la forme chimique la plus active biologiquement (phytotoxique). Dans les conditions normales, la concentration de cette forme chimique est environ le millième de celle du SO_2 total dans l'eau.

Phytotoxicité

Le soufre est un élément essentiel au métabolisme des plantes car il est un constituant important des acides aminés, des protéines et de certaines vitamines. La teneur en soufre d'une plante indemne varie de 500 à 1400 ppm (masse sèche), selon l'espèce. Une concentration inférieure à 250 ppm est considérée comme critique, donnant lieu à des symptômes de carence et à la substitution du soufre par le sélénium (s'il est disponible) dans les acides aminés et les protéines. Une partie, sinon la totalité, des besoins en soufre des plantes peuvent être satisfaits par absorption directe du SO_2 atmosphérique lorsque la concentration de celui-ci est très faible. Si cette concentration dépasse un certain seuil critique, la photosynthèse, la respiration et d'autres processus cellulaires fondamentaux sont entravés. Lorsque la concentration et la durée d'exposition augmentent, les dommages deviennent irréversibles et la plante meurt.

On pense souvent que la végétation n'est pas atteinte lorsqu'il n'y a pas de symptômes visibles de phytointoxication. C'est une erreur. Par exemple, lors de nombreuses études en serre, il a été démontré que le SO_2 réduisait la croissance et le rendement avant qu'aucun symptôme visible n'apparaisse. À l'heure actuelle, on est généralement d'avis que l'effet initial se produit au niveau biochimique (perturbation de la photosynthèse, de la respiration, etc.), que les dommages s'étendent au niveau utltrastructural (désorganisation des membranes cellulaires qui gouvernent le transport cellulaire et intracellulaire des éléments nutritifs et autres métabolites), puis au niveau cellulaire (destruction des parois cellulaires, du mésophylle et des noyaux). C'est alors que les symptômes visibles apparaissent (chlorose et nécrose des tissus foliaires). Comme l'objectif du guide est d'aider à établir le diagnostic sur le terrain, l'accent princi-

pal est mis sur les symptômes visibles seulement.

Le dépôt de quantités importantes de SO_2 peut modifier suffisamment les caractéristiques du sol pour causer des dommages indirects à la végétation ou un ralentissement de la croissance. On attribue de tels dommages à : (1) une acidification chimique du sol; (2) un appauvrissement du sol en éléments nutritifs qui, rendus plus solubles, sont lessivés; (3) des modifications de la microflore (responsable du renouvellement des éléments nutritifs) sous l'effet de l'acidité accrue; et (4) la libération d'éléments phytotoxiques en conditions acides. Par exemple, l'aluminium (normalement présent sous forme de silicate) et le manganèse, qui sont toxiques pour de nombreuses espèces de plantes, deviennent facilement assimilables par la végétation dans un sol acide.

Dans le tableau qui suit, les principales essences de la forêt boréale sont classées en fonction de leur sensibilité au SO_2 révélée par les symptômes visibles.

Tableau 1. Classement des essences de la forêt boréale en fonction de leur sensibilité au SO_2*

Très sensibles	Moyennement sensibles	Relativement tolérantes
Aulne vert	Peuplier baumier	Sapin subalpin
Bouleau à papier	Peuplier faux-tremble	Saule
Épinette blanche	Pin gris	
Épinette noire	Pin tordu latifolié	
Mélèze laricin	Sapin baumier	

* Par ordre alphabétique.

Selon la concentration et la durée d'exposition, le SO_2 peut causer une variété de symptômes visibles sur la végétation forestière. Ces symptômes peuvent être classés comme étant aigus, chroniques ou réversibles.

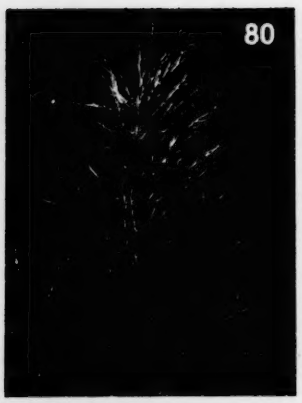
L'exposition à des concentrations de SO_2 de 0,25 à 0,30 ppm pendant des périodes plus ou moins longues au cours de la saison de croissance donne lieu à un **dommage aigu.** Chez les conifères, les symptômes comprennent une chlorose soudaine sur la majeure partie des vieilles aiguilles qui généralement brunissent, se dessèchent et se nécrosent dans la suite. Chez les feuillus, l'exposition au SO_2 produit une apparence mouillée et une légère chlorose à la face inférieure des feuilles en raison de l'écoulement de fluides cellulaires par les parois cellulaires. La face supérieure ne prend pas un aspect mouillé car elle est couverte d'une couche de cire. Les symptômes apparaissent lorsque la concentration des diverses formes ioniques du SO_2 dans les tissus dépasse les capacités normales d'assimilation du métabolisme de la plante. Les premiers symptômes de chlorose ressemblent à ceux de la sénescence naturelle.

Une **dommage chronique** résulte de l'exposition périodique d'espèces sensibles à des concentrations variées de SO_2 (0,10 à 0,25 ppm) pendant une période assez longue pour perturber partiellement au moins un processus métabolique. Lorsque de telles perturbations se répètent pendant une longue période, des symptômes de dommages chroniques comme la chlorose persistante et le

Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'anhydride sulfureux sur les conifères (fig. 79 à 94).

Fig. 79 Décoloration du feuillage du pin et du peuplier faux-tremble. Le pin (au centre) présente une nécrose considérable, le peuplier (à gauche) affiche une décoloration foliaire massive, alors que l'épinette blanche (à droite) n'est pas affectée. **Fig. 80** Chlorose des aiguilles d'une pousse de pin une heure après une exposition aiguë. **Fig. 81** Brunissement des aiguilles et dessiccation de la pousse deux jours après une exposition aiguë (la même pousse qu'à la figure 80). **Fig. 82** Nécrose totale d'un bourgeon terminal de pin après une exposition intense. **Fig. 83** Nécrose foliaire totale sur un sapin baumier. À remarquer la chute prématurée des aiguilles. **Fig. 84** Brunissement léger d'une nouvelle pousse d'une épinette noire. **Fig. 85** Nécrose typique d'aiguilles de pin progressant à partir de l'extrémité dorsale. **Fig. 86** Nécrose partielle d'aiguilles de l'épinette blanche. **Fig. 87** Décoloration des aiguilles du pin commençant à partir de l'extrémité dorsale. **Fig. 88** Bourgeon indemne d'épinette noire ayant éclos après une seule exposition. **Fig. 89** Débourrement d'un bourgeon terminal de pin après une seule exposition intense. **Fig. 90** Perte des vieilles aiguilles chez l'épinette blanche. **Fig. 91** Nécrose des bourgeons et des aiguilles, et chute prématurée d'aiguilles chez l'épinette noire. **Fig. 92** Chlorose persistante chez le pin, entraînant une réduction partielle du développement. **Fig. 93** Rabougrissement du pin causé par des expositions très variables. **Fig. 94** Symptômes produits sur le feuillage de l'épinette blanche par une exposition intense.

79


80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

rabougrissement commencent à se manifester. Chez les conifères, des dommages chroniques étendus peuvent entraîner une chute prématurée des aiguilles. De même, chez les feuillus, de telles lésions couvrant toute la surface de la feuille peuvent entraîner la mort précoce de celle-ci.

Des **symptômes transitoires** sont provoqués par des périodes relativement brèves d'exposition à de faibles concentrations de SO_2 (moins de 0,30 ppm). Il s'agit d'une chlorose temporaire. Le feuillage se rétablit complètement en quelques jours dans un environnement à concentration en SO_2 faible ou nulle. Ces symptômes sont dus à une dégradation partielle de la chlorophylle, mais les processus métaboliques de la production de celle-ci ne sont pas altérés en permanence.

Symptômes sur les conifères

En général, le SO_2 provoque des symptômes similaires chez tous les conifères. Par exemple, les symptômes provoqués par l'exposition à des concentrations aiguës au SO_2 sur l'épinette blanche (fig. 94) et l'épinette noire (fig. 91) ressemblent à ceux provoqués sur le pin (fig. 81 et 89).

Les symptômes visibles sur les essences forestières dépendent des caractéristiques de la pollution par le SO_2 et de la sensibilité de chaque essence. Dans les peuplements mélangés, il arrive souvent que les épinettes, relativement tolérantes pour le SO_2, n'en souffrent pas alors que le pin et certains feuillus accusent une décoloration du feuillage (fig. 79). Les effets sur les arbres plus âgés vont d'un dépérissement grave de la cime à la mort totale de l'arbre après des attaques répétées (fig. 79 et 83).

Soumises à des concentrations aiguës de SO_2, les nouvelles aiguilles du pin deviennent rapidement chlorotiques (fig. 80) puis brunissent, se dessèchent et se nécrosent (fig. 81). Il peut arriver que de jeunes semis soient tués par une seule exposition de forte intensité qui détermine la dessiccation et la mort des tissus vitaux (fig. 82).

L'exposition au SO_2 en forte concentration immédiatement après le débourrement printanier peut causer de graves lésions aux jeunes pousses. En effet, les nouveaux tissus sont alors très tendres et en croissance rapide (fig. 84) et, de ce fait, extrêmement sensibles. Si l'exposition a lieu avant l'éclosion des bourgeons, les bourgeons non atteints peuvent sortir de l'état de dormance et produire un nouveau feuillage normal (fig. 88 et 89). Sur les jeunes aiguilles matures, la décoloration se manifeste d'abord à la pointe et s'étend progressivement vers la base (fig. 85 à 87). La totalité ou une partie seulement de l'aiguille peut être atteinte. Les tissus chlorotiques se trouvent généralement à côté de la zone nécrotique. Les aiguilles qui n'ont été que partiellement touchées sont sujettes à d'autres lésions en cas d'exposition subséquente au SO_2, ce qui entraîne l'apparition de zones de lésions correspondant aux diverses périodes d'exposition au polluant.

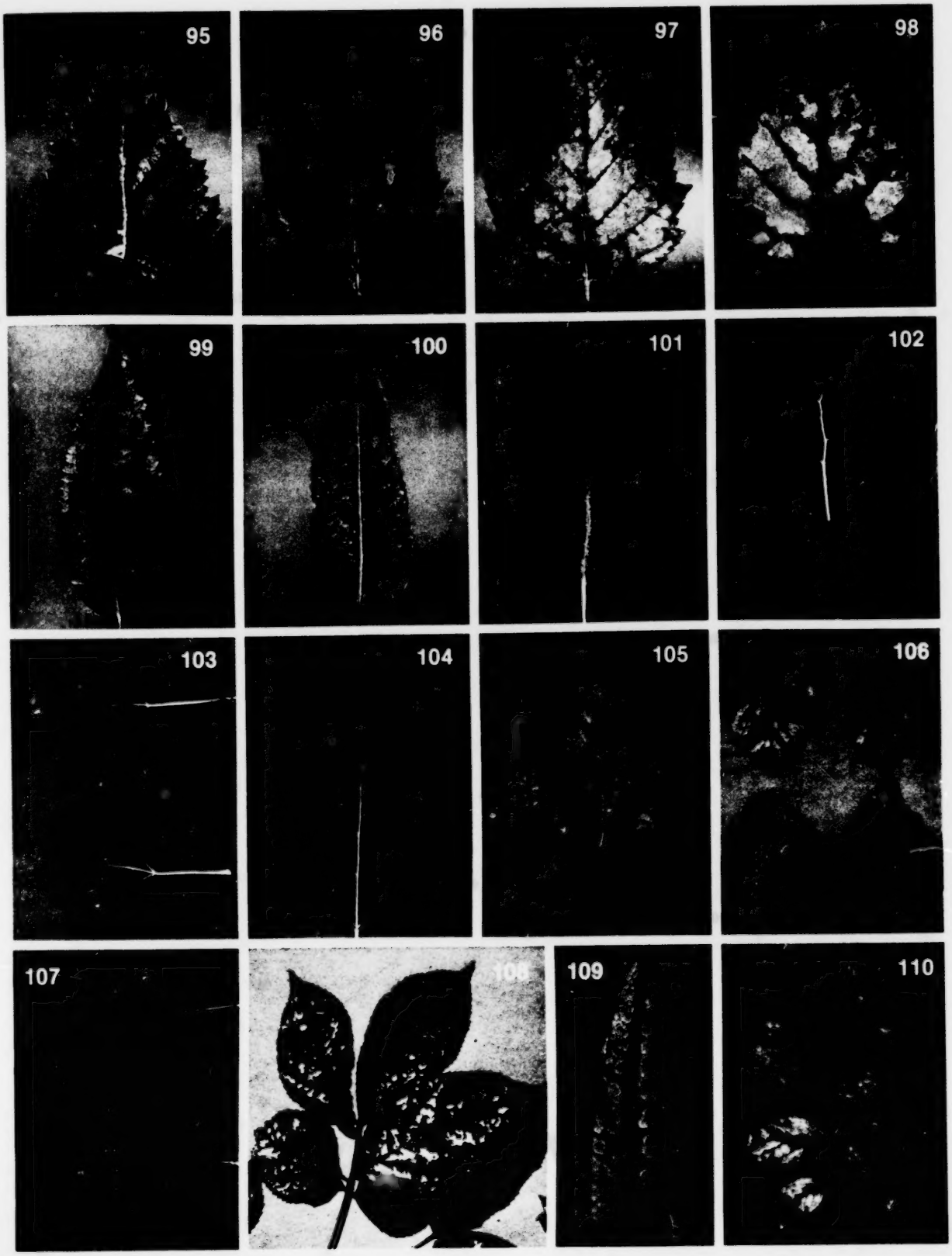
Dans le cas des arbres ayant un feuillage de plusieurs années, les tissus les plus sensibles à une forte exposition au SO_2 sont ceux du nouveau feuillage consécutif au débourrement printanier. Viennent ensuite les tissus des aiguilles les plus anciennes, plus vulnérables que ceux des aiguilles matures plus jeunes, qui grâce à leur activité métabolique plus grande peuvent assimiler plus de soufre. C'est ce qui explique que les aiguilles matures les plus vieilles peuvent tomber prématurément alors que les jeunes ne sont presque pas affectées (fig. 90). Sur les conifères fortement attaqués, on observe à la fois la mort des bourgeons et la chute prématurée aiguilles (fig. 91).

Parfois, les aiguilles de conifères ne réagissent pas de la même façon à des concentrations chroniques de SO_2, de sorte que certaines aiguilles sont plus rabougries que les autres. Ce phénomène est dû à la non-uniformité des concentrations de SO_2 et au détournement d'éléments nutritifs des tissus plus atteints vers ceux qui le sont moins, ce qui entraîne une croissance inégale (fig. 92 et 93). Un autre type de réaction différentielle est causé par

---

Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'anhydride sulfureux sur les feuillus (fig. 95 à 110).

Fig. 95 à 98 Dommages progressifs sur le feuillage du bouleau. **Fig. 95** Phase initiale de la chlorose. **Fig. 96** Progrès de la chlorose, feuille prenant un aspect mouillé. **Fig. 97** Brunissement et nécrose. **Fig. 98** Nécrose avancée. **Fig. 99** Début de chlorose chez le peuplier. **Fig. 100** Début de chlorose chez le saule. **Fig. 101** Aspect mouillé de la face inférieure d'une feuille de peuplier faux-tremble. **Fig. 102** Chlorose foliaire marginale et internervaire chez le peuplier faux-tremble. **Fig. 103** Nécrose marginale et internervaire chez le peuplier faux-tremble à la suite d'une exposition aiguë. **Fig. 104** Lésions marginales et internervaires avancées chez le peuplier. **Fig. 105** Nécrose aiguë des feuilles du saule. **Fig. 106** Divers degrés de nécrose chez l'aulne. **Fig. 107** Décoloration presque complète de feuilles du peuplier – chlorose suivie de nécrose – à la suite d'une exposition intense. Les feuilles qui avaient pris une forme recourbée ont été redressées pour faire voir les dommages. **Fig. 108** Symptômes aigus chez l'aralie à tige nue. **Fig. 109** Symptômes aigus avancés chez le lédon du Groenland. **Fig. 110** Symptômes chez le rosier aciculaire.


95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110

l'exposition de la cime aux vapeurs de SO_2. Ainsi, les symptômes peuvent être plus prononcés du côté directement exposé.

Dans les cas d'intoxication chronique, les symptômes visibles se limitent à une chlorose persistante du feuillage, plus ou moins prononcée (fig. 92 et 93). Le feuillage ne tombe pas immédiatement, mais la croissance normale et le rendement de la plante sont réduits. Des lésions chroniques massives peuvent réduire la durée de rétention des aiguilles. Les agressions d'autres origines que la pollution, comme la tacheture hivernale (fig. 30 et 31), peuvent prédisposer la végétation à être gravement endommagée par le SO_2.

Symptômes sur les feuillus

Après une exposition à de fortes concentrations de SO_2, les symptômes de dommages aigus évoluent rapidement. Chez le bouleau, l'un des feuillus les plus sensibles au SO_2, les symptômes foliaires vont d'une légère chlorose à une nécrose internervaire presque totale (fig. 95 à 98). Les premiers symptômes chlorotiques sur les feuilles du peuplier et du saule (fig. 99 et 100) sont similaires à ceux provoqués par une exposition aiguë ou chronique sur les feuilles du bouleau.

Les premiers symptômes visibles de l'exposition au SO_2 chez les feuillus sont la mouillure de la face inférieure de la feuille et une légère chlorose (fig. 101). Après une exposition prolongée, il apparaît ensuite une chlorose sévère et un brunissement sur les bords et entre les nervures (fig. 102 à 106). La décoloration progresse rapidement (fig. 107) et s'accompagne de l'enroulement et du flétrissement des feuilles par suite de la dessiccation rapide des tissus foliaires.

Les bourgeons bien formés sont rarement endommagés par le SO_2 car ils sont protégés par des écailles. Toutefois, ils peuvent être atteints, ainsi que le jeune feuillage, s'ils sont exposés à des émanations massives quelques jours après le début du débourrement printanier.

Les symptômes foliaires visibles de dommages chroniques provoqués par le SO_2 chez les feuillus comprennent la chlorose qui peut se limiter à une partie de la feuille (fig. 102) ou en affecter uniformément toute la surface (fig. 99 et 100) et la chute prématurée des feuilles.

Les dommages transitoires infligés aux feuillus par le SO_2 se présentent comme de très petites taches au bord des feuilles et dans la zone internervaire. De tels dommages passent ordinairement inaperçus à moins que les caractéristiques d'une végétation normale n'aient été bien établies. Les plantes peuvent s'en remettre complètement si elles se trouvent dans une atmosphère exempte de SO_2 après l'exposition initiale.

Le SO_2 provoque chez les plantes supérieures de la couverture végétale des symptômes (fig. 108 à 110) qui ressemblent à ceux que l'on observe sur les feuillus, soit la chlorose, l'aspect mouillé, le recourbement, le flétrissement, le brunissement et la nécrose totale. Les arbres de l'étage supérieur protègent souvent les espèces du sous-étage contre les fortes concentrations de SO_2 provenant d'une source située à une hauteur supérieure à celle du couvert. Selon les conditions atmosphériques et la hauteur des cheminées, les dommages pourront se limiter aux arbres de l'étage supérieur ou aux plantes de la couverture végétale, ou bien s'observer sur les uns et les autres.

Lectures suggérées

Hindawi, J.J. 1970. *Air pollution injury to vegetation.* United States Department of Health, Education, and Welfare. National Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71.

Jacobson, J.S. & A.C. Hill (eds.) 1970. *Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas.* Air Pollution Control Association. Pittsburg, Pennsylvania. Informative Report 1.

Linzon, S.N. 1965. Sulphur dioxide injury to trees in the vicinity of petroleum refineries. *Forestry Chronicle* 41:245-247 & 250.

Linzon, S.N. 1978. *Effects of airborne sulphur pollutants on plants.* Pages 109-162 *in* Sulphur in the environment. Part II. Ecological impacts. J.O. Nriager (ed.). J. Wiley & Sons Inc. New York.

Treshow, M. 1970. *Environment and plant response.* McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario.

United States Department of Agriculture. 1973 *Air Pollution damages trees.* Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.

Hydrocarbures

Des hydrocarbures sont libérés par l'industrie du gaz naturel et du pétrole sous forme d'effluents liquides ou gazeux ou bien de déversements accidentels de pétrole. Les émissions aériennes consistent généralement en hydrocarbures imbrûlés provenant des usines de traitement et de raffinage, de craquage des combustibles et des condensats, des ruptures de conduites ou du mauvais fonctionnement des soupapes régulatrices de pression dans les gazoducs sous haute pression ainsi que des éruptions de puits de gaz et de pétrole. Les déversements d'hydrocarbures peuvent être dus à des bris de pipeline, à des défectuosités des soupapes, à des fuites des bassins de stockage et à d'autres types de problèmes.

Les générateurs d'électricité alimentés au charbon libèrent non seulement du SO_2, des oxydes d'azote et des métaux en trace, mais aussi des quantités notables de divers hydrocarbures.

Hydrocarbures liquides

La phytotoxicité de la plupart des hydrocarbures libérés par l'industrie pétrolière dépend en premier lieu de la longueur de la chaîne carbonée. En général, les hydrocarbures légers (de 1 à 13 carbones) sont plus phytotoxiques que les lourds (plus de 13 carbones) car ils peuvent passer assez facilement à travers la cuticule cireuse des feuilles et des bourgeons. Les effluents de l'industrie du gaz naturel et du pétrole contiennent des hydrocarbures légers et des hydrocarbures lourds en diverses proportions suivant la nature de la formation souterraine. Les hydrocarbures lourds sont moins volatils que les légers, et les dommages qu'ils causent à la végétation sont surtout attribuables à leur dépôt sur les plantes, ce qui inhibe les processus d'échanges gazeux et de transpiration par les stomates.

Les effets des émissions aériennes d'hydrocarbures sur la végétation forestière et les sols varient selon l'époque de l'année. Au cours de la saison de croissance, de la fin du printemps au début de l'automne, le feuillage des arbres (feuillus et conifères) est le principal récepteur des hydrocarbures et procure ainsi une protection aux tiges principales et aux plantes de la couverture vivante. Par contre, à la fin de l'automne, avant la chute de la neige, et au début du printemps, avant la feuillaison, le feuillage des conifères, les branches des feuillus et la couverture végétale (comprenant les bryophytes et les lichens) sont tous atteints. En hiver, une couche épaisse de neige au sol peut protéger jusqu'à un certain point les plantes de la couverture vivante et le sol, en accordant un certain temps pour la volatilisation d'une partie des hydrocarbures les plus toxiques et pour le nettoyage.

Les déversements de pétrole sur le sol constituent une autre source importante de dommage à la végétation forestière et aux sols par les hydrocarbures. En hiver, lorsque les volumes en cause sont importants, les hydrocarbures réussissent ordinairement à traverser la couche de neige pour attaquer gravement les plantes de la couverture vivante. Parfois, leur température est même assez élevée pour faire fondre la neige, ce qui augmente les dommages possibles. Les hydrocarbures peuvent être phytotoxiques s'ils s'infiltrent jusque dans la zone des racines et pénètrent dans le tissu cambial vital. Ils bouleversent le régime hydrique, nuisent aux populations microbiennes du sol assurant le renouvellement des éléments nutritifs, entraînent des modifications du pH et font obstacle à l'aération des sols. Dans les zones où se produisent des déversements importants, le défaut d'aération ralentit considérablement leur dégradation. On peut l'accélérer par l'élimination adéquate des mares d'hydrocarbures, par la mise sous culture pour faciliter l'aération des sols et favoriser ainsi l'activité microbienne, par un apport d'éléments minéraux et par l'ajout de chaux pour corriger le pH.

Symptômes sur les conifères : Les retombées d'hydrocarbures provenant de la combustion incomplète ou d'éruptions de puits de pétrole provoquent un noircissement du feuillage des conifères (fig. 111). En général, seul le feuillage directement exposé s'en enduit (fig. 112). Les hydrocarbures légers agissent rapidement, entraînant la défoliation en quelques semaines (fig. 113).

Les hydrocarbures légers donnent un aspect huileux au feuillage (fig. 114), tandis que les hydrocarbures lourds y laissent une couche goudronneuse (fig. 115 et 116). Comme ces derniers ne pénètrent pas facilement à l'intérieur des bourgeons une nouvelle pousse apparaît souvent au cours de la saison de croissance suivante (fig. 115), ce qui peut suffire à assurer la survie de l'arbre.

Les aiguilles touchées présentent des lésions superficielles et un reflet huileux (fig. 117). Un chlorose commençant au point de contact apparaît d'abord sur les jeunes aiguilles (fig. 118 et 119). Lorsque les hydrocarbures légers sont abondants, la chlorose est suivie d'une nécrose générale (fig. 120) et, finalement, l'arbre meurt. Les tissus morts commencent à apparaître à l'extrémité des aiguilles et s'étendent graduellement vers la base (fig. 121). Après une telle nécrose des tissus, on assiste à la chute prématurée des aiguilles, puis à la mort de l'arbre (fig. 122).

Les hydrocarbures, et en particulier les légers, peuvent sérieusement entraver la croissance des arbres en pénétrant dans les tissus conducteurs du phloème et les tissus vitaux du cambium de la tige principale (fig. 123). Le côté de l'arbre faisant face à la source est ordinairement le seul à s'enduire (fig. 124). Une exposition partielle du tronc et du feuillage peut n'entraîner qu'un ralentissement temporaire de la croissance.

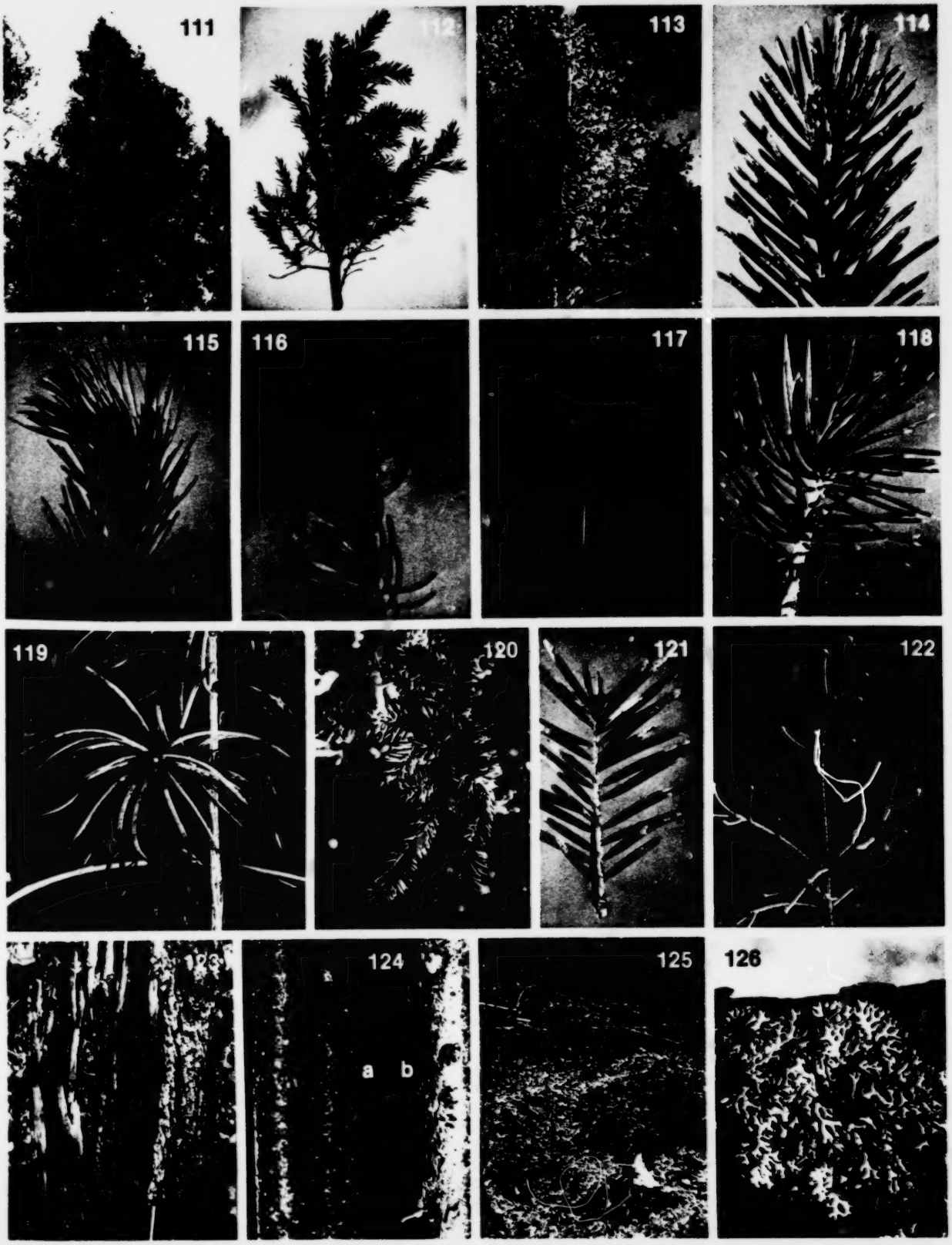
Autres espèces de plantes dans les peuplements résineux : Lorsqu'il y a saturation de la couche organique du sol par les hydrocarbures, ceux-ci peuvent descendre jusqu'aux racines des plantes de la couverture vivante à racines peu profondes. Les composés qui s'infiltrent ainsi peuvent être tellement toxiques pour les racines que ces plantes meurent (fig. 125). Les lichens arboricoles sont aussi très sensibles aux retombées d'hydrocarbures. Les symptômes externes visibles comprennent une surface huileuse et le brunissement du thalle (fig. 126). Il arrive que les hydrocarbures absorbés empêchent le thalle du lichen tué de se dessécher et de s'effriter.

Symptômes sur les feuillus : Le feuillage des essences feuillues est plus sensible aux hydrocarbures que celui des conifères, peut-être parce que ceux-ci possèdent une cuticule bien développée. Les symptômes foliaires sur les feuillus sont l'enroulement, la torsion et la décoloration; ils apparaissent quelques heures après l'exposition (fig. 127 à 130). Quelques semaines plus tard, c'est la défoliation. Les lésions se limitent à la partie exposée de la feuille (fig. 131). Les fractions légères s'étalent uniformément sur le limbe, ce qui donne un aspect luisant distinctif (fig. 132 à 134). L'apparition des symptômes correspond souvent au mode de dépôt des hydrocarbures. En général, seuls les tissus foliaires sont enroulés et tordus (fig. 135 et 136). Par comparaison, dans le cas de certaines agressions par des herbicides, ce sont tous les tissus, y compris ceux des rameaux et des branches, qui présentent de tels symptômes.

À moins d'être en forte concentration ou mélangés à des fractions légères, les hydrocarbures lourds ne causent ordinairement pas de dommages permanents aux bourgeons, au phloème ou au cambium (fig. 137). Les bourgeons donnent de nouvelles pousses à la prochaine saison de croissance. Les mélanges d'hydrocarbures lourds et d'hydrocarbures légers peuvent endommager de façon permanente les tissus végétaux en passant à travers les écailles des bourgeons pour atteindre le cambium (fig. 138).

Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'hydrocarbures légers et d'hydrocarbures lourds sur les conifères (fig. 111 à 126).

Fig. 111 Houppier d'une épinette blanche enduit d'hydrocarbures lourds émis par une torche de brûlage. **Fig. 112** Branche d'épinette blanche fortement enduite d'hydrocarbures lourds. **Fig. 113** Épinettes blanches enduites d'hydrocarbures légers provenant d'une torche de brûlage. À remarquer la chlorose et la chute partielle des aiguilles, attribuables à la phytotoxicité des hydrocarbures, surtout chez les aiguilles plus âgées. **Fig. 114** Nécrose partielle sur une branche d'épinette blanche à la suite d'une aspersion d'hydrocarbures légers. À remarquer les taches d'hydrocarbures à la surface des aiguilles. **Fig. 115** Couche d'hydrocarbures lourds sur le feuillage d'un an d'un pin. Le fait que la pousse de l'année ne soit pas enduite indique que l'aspersion a eu lieu avant l'éclosion des bourgeons. **Fig. 116** Branche d'épinette blanche enduite d'hydrocarbures lourds. **Fig. 117** Dommage et reflet huileux sur des aiguilles de pin après l'enlèvement d'une pellicule d'hydrocarbures légers. **Fig. 118** Symptômes de chlorose apparaissant d'abord sur les plus jeunes aiguilles et sur les extrémités des branches chez l'épinette blanche après une aspersion d'hydrocarbures légers. **Fig. 119** Symptômes chlorotiques sur une pousse de mélèze laricin après une aspersion d'hydrocarbures légers. **Fig. 120** Nécrose avancée sur une épinette blanche fortement enduite d'hydrocarbures légers. **Fig. 121** Nécrose partielle d'aiguilles de sapin baumier suite à une aspersion d'hydrocarbures légers. À remarquer les taches d'hydrocarbures à la surface des aiguilles. **Fig. 122** Chez l'épinette blanche, chute prématurée des aiguilles et mort des bourgeons consécutivement à une aspersion d'hydrocarbures légers. **Fig. 123** Tronc d'une épinette blanche où le cambium, le phloème et les tissus externes de l'aubier ont été détruits par la pénétration d'hydrocarbures légers à travers l'écorce. **Fig. 124** Tronc d'un arbre enduit d'hydrocarbures légers : (a) côté faisant face à la source d'émission; (b) côté opposé à la source d'émission. **Fig. 125** Destruction totale de la couverture vivante à la suite d'une retombée massive d'hydrocarbures légers. À remarquer les aiguilles tombées au sol. **Fig. 126** Thalle d'un lichen arboricole endommagé (brunissement) par une retombée d'hydrocarbures légers.


111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
a b
125
126

Autres espèces de plantes dans les peuplements feuillus : La couverture végétale est ordinairement protégée par le feuillage des arbres contre les retombées d'hydrocarbures et n'est atteinte que lorsque les gouttelettes sont assez lourdes pour traverser le feuillage de l'étage supérieur ou que le vent les charrie près du sol. La plupart des plantes hautes de la couverture vivante réagissent aux hydrocarbures à peu près comme le feuillage des essences feuillues. Les hydrocarbures légers provoquent une chlorose et un brunissement suivis d'une nécrose marginale et de la torsion des feuilles (fig. 139 et 140). Les symptômes deviennent prononcés avec le temps (fig. 141). Éventuellement, les tissus se trouvant au-dessus du sol, y compris ceux des lichens et des bryophytes, sont gravement atteints (fig. 142). Si les hydrocarbures ne s'infiltrent pas jusqu'aux racines, une nouvelle pousse peut réapparaître chez les plantes supérieures après un certain temps. Les effets phytotoxiques d'un déversement d'hydrocarbures sont persistants, et la végétation ne se rétablit pas tant que les hydrocarbures n'auront pas été dégradés par l'activité microbienne ou éliminés d'une autre façon.

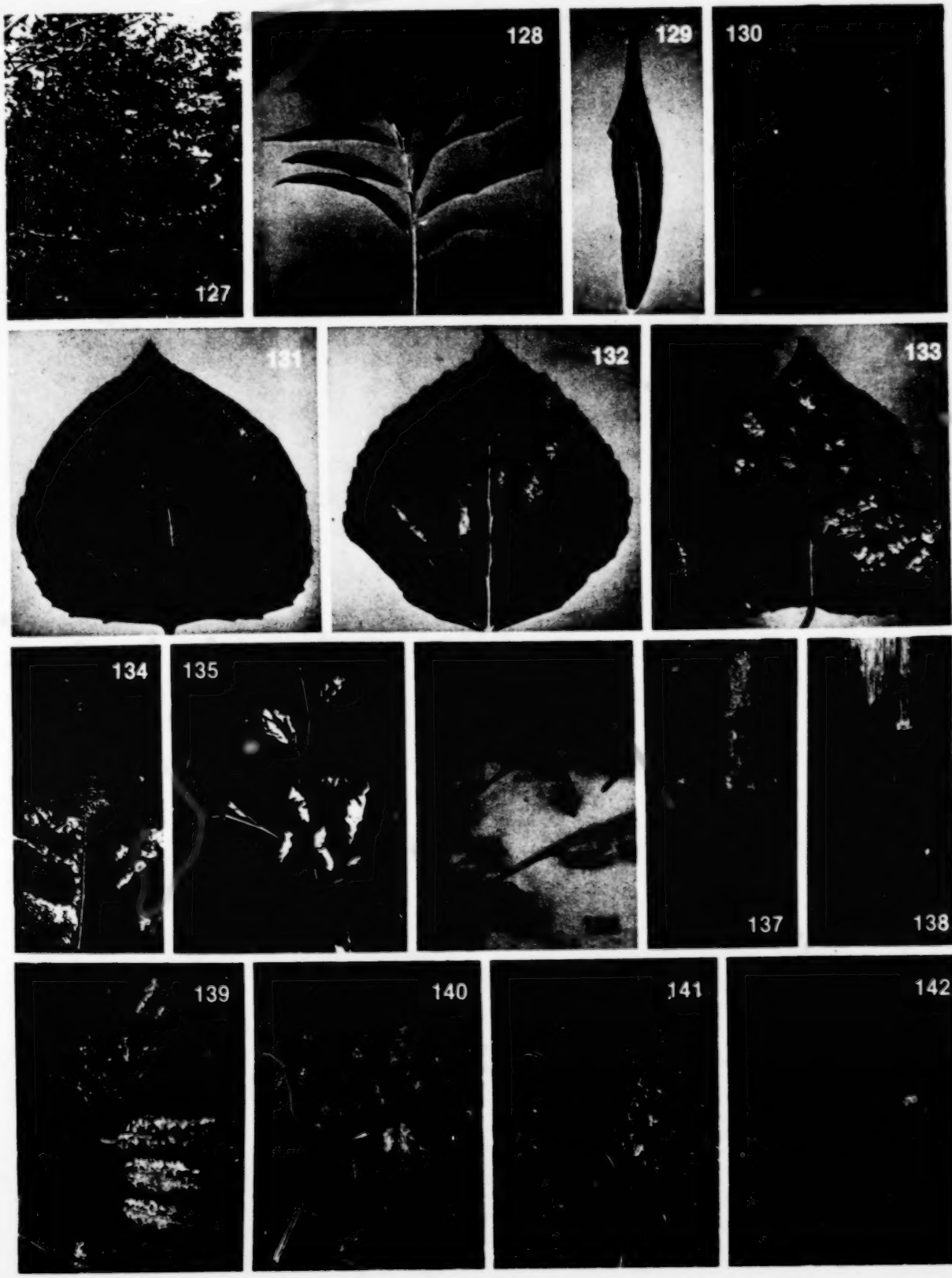
Hydrocarbures gazeux

L'éthylène, l'acétylène, le propylène et d'autres hydrocarbures apparentés sont des produits secondaires de la combustion incomplète du gaz naturel, du pétrole, du charbon et d'autres hydrocarbures. Ils peuvent être présents en quantités variables dans les émissions des industries d'extraction des ressources naturelles. Comme les symptômes de la phytotoxicité de ces gaz sont similaires et que l'éthylène en est le plus répandu au voisinage des zones industrielles (usines de polyéthylène, générateurs d'électricité alimentés au charbon et au gaz, etc.), celui-ci sera étudié comme type représentatif de tous ces hydrocarbures gazeux.

L'éthylène est un produit normal du métabolisme des plantes et, en faibles concentrations, joue un rôle important dans le mûrissement et le vieillissement des fruits. Toutefois, à une concentration dépassant 25 parties par milliard en 48 h, il peut nuire à la croissance de nombreuses espèces cultivées et est considéré comme un polluant de l'air. Même si sa concentration dans l'atmosphère près des zones urbaines importantes dépasse souvent 100 parties par milliard, il est rare qu'il produise des dommages aigus. Bien que certains de ses symptômes aient été produits au laboratoire, on sait très peu de choses des effets de l'éthylène sur la végétation dans la nature. Lorsque des installations d'extraction des ressources naturelles sont implantées à proximité immédiate de zones forestières, l'éthylène et ses isologues peuvent avoir un effet marqué sur la croissance végétale. Il est connu que l'éthylène accélère le processus de vieillissement en réduisant la croissance et en induisant la chlorose et la nécrose et, peut-être aussi, la chute du feuillage. Les premiers symptômes apparaissent ordinairement sur les tissus plus âgés et progressent lentement.

Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des émissions d'hydrocarbures légers et d'hydrocarbures (fig. 127 à 142).

Fig. 127 Brunissement et enroulement du feuillage d'un saule provoqués par une aspersion d'hydrocarbures légers. **Fig. 128** Gros plan du feuillage de la figure 127. **Fig. 129** Lésion grave d'une feuille de saule par suite d'une aspersion d'hydrocarbures légers. **Fig. 130** Enroulement et brunissement aigus d'une feuille de bouleau après une aspersion d'hydrocarbures légers. **Fig. 131** Feuille de peuplier faux-tremble présentant des tissus nécrotiques foncés aux endroits les plus affectés à la suite d'une retombée d'hydrocarbures légers. **Fig. 132** Feuille de peuplier faux-tremble présentant un reflet huileux et des lésions à la suite d'une retombée d'hydrocarbures légers. **Fig. 133** Aggravation des symptômes précédemment mentionnés à la figure 132. **Fig. 134** Feuille de peuplier sur laquelle des symptômes commencent à apparaître une heure après une aspersion d'hydrocarbures légers. **Fig. 135** Enroulement, brunissement et reflet huileux sur un aulne suite à une retombée d'hydrocarbures légers. **Fig. 136** Feuillage d'un saule après une légère retombée d'hydrocarbures lourds. **Fig. 137** Tronc d'un peuplier faux-tremble légèrement enduit d'hydrocarbures lourds. À remarquer le cambium vert non atteint dans la partie écorchée. **Fig. 138** Écorce de peuplier faux-tremble enduite d'un mélange d'hydrocarbures légers et d'hydrocarbures lourds. À remarquer la pénétration du mélange polluant jusqu'au cambium. **Fig. 139** Décoloration du feuillage d'un rosier aciculaire une semaine après une retombée d'hydrocarbures légers. **Fig. 140** Chlorose et nécrose des feuilles d'une aralie à tige nue une semaine après une retombée d'hydrocarbures légers. **Fig. 141** Chlorose et enroulement chez les plantes de la couverture vivante (graminées et arbrisseaux surtout) une semaine après une retombée massive d'hydrocarbures légers. **Fig. 142** Ces mêmes plantes mortes un an après.


127
128
129
130
131
132
133
134
135
137
138
139
140
141
142

Émissions des charbonnages

Les vastes gisements de charbon de l'Ouest canadien sont une autre source importante d'hydrocarbures. Même si la majeure partie du charbon est exportée, on en brûle une quantité considérable dans les Prairies pour la production d'électricité. Les effluents charriés par le vent renferment des hydrocarbures, du SO_2, des cendres volantes, des oxydes d'azote et des métaux en traces comme l'arsenic, le cadmium, le plomb, le nickel, le vanadium et le mercure. Les poussières de charbon au voisinage d'exploitations minières peuvent causer des dommages physiques au feuillage en obstruant les stomates et en réduisant ainsi la capacité d'échanges gazeux. Les incidences des émissions de substances telles que le SO_2 et les éléments à l'état de traces sont examinées aux pages 19 à 24.

Lectures suggérées

Alberta Environment and University of Calgary. 1975, *Conference on the environmental effects of oil and salt water spills on land.* Banff, Alberta, Nov. 6-7, 1975.

Hindawi, I.J. 1970. *Air pollution injury to vegetation.* United States Department of Health, Education, and Welfare. National Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71. Pages 32-33.

Déversements d'eau salée

L'eau saline constitue l'un des principaux sous-produits de l'industrie du pétrole et du gaz naturel dans l'Ouest canadien. Sa production par les méthodes classiques d'extraction atteint les millions de barils chaque année et s'accroît graduellement à mesure que le pétrole devient moins abondant dans les puits plus anciens et que l'eau saline s'infiltre dans les formations pétrolifères.

La pratique consiste à retourner l'eau salée dans les formations où elle s'est produite au moyen de puits de réinjection, mais étant donné la taille et la nature des opérations, il se produit inévitablement des déversements accidentels d'eau salée et de pétrole. Ces déversements sont dus à des bris de pipeline, causés par la corrosion, une pression excessive ou des perturbations, ou bien au manque d'étanchéité des soupapes régulatrices de pression.

Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets des déversements d'eau salée sur la végétation forestière (fig. 143 à 158).

Fig. 143 Coloration brun roux du houppier d'une épinette blanche. **Fig. 144** Coloration magenta des houppiers de pins morts ou moribonds. **Fig. 145** Brunissement d'une branche d'épinette noire. **Fig. 146** Coloration magenta du feuillage de l'année d'une épinette noire. **Fig. 147** Coloration magenta chez le pin. **Fig. 148** Gros plan d'aiguilles de pin ayant pris une teinte magenta. **Fig. 149** Coloration magenta du feuillage de l'année précédente d'une épinette noire. Des symptômes de dommages commencent à paraître à l'extrémité des aiguilles des pousses de l'année. **Fig. 150** Mort du cambium et des tissus de l'aubier de la tige d'un pin. À remarquer l'absence du cambium de couleur verte sous l'écorce. **Fig. 151** Début de décoloration chez le bouleau. **Fig. 152** Symptômes plus avancés chez le bouleau. **Fig. 153** Nécrose chez le saule. **Fig. 154** Dommage au stade initial chez le peuplier faux-tremble. À remarquer l'aspect trempé de l'extrémité et des marges de la feuille. **Fig. 155** Symptômes plus avancés d'intoxication chez le peuplier faux-tremble. À remarquer la progression de la chlorose et de la nécrose vers la partie centrale de la feuille. **Fig. 156** Chlorose, nécrose et enroulement d'une feuille de peuplier. **Fig. 157** Décoloration chez le lédon du Groenland. Progression des dommages vers la base des feuilles indiquant la zone d'accumulation de sel. **Fig. 158** Couverture végétale morte (principalement des graminées et des arbrisseaux).

143

144

145

146

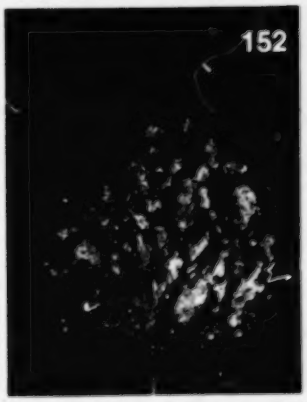
147

148

149

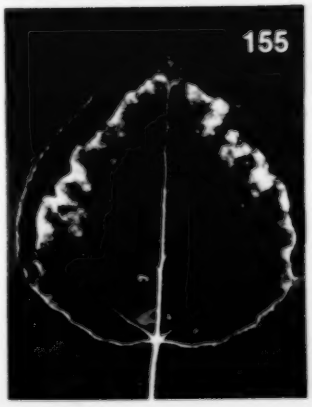
150

151


152

153

154


155

156

157

158

Phytotoxicité

Le chlorure de sodium (NaCl) est le principal constituant de la saumure des champs de pétrole et de gaz naturel susceptible de causer de sérieux dommages à la végétation et aux sols. Sa phytotoxicité provient principalement de l'accumulation du chlorure en fortes concentrations dans les tissus végétaux. Les tissus foliaires sont de si bons accumulateurs que la concentration dans les feuilles peut être plusieurs fois supérieure à celle qui existe dans le sol autour.

Les déversements d'eau salée sur le sol ont en général des effets plus durables que les déversements de pétrole. C'est probablement dû au fait que, contrairement au sel, les hydrocarbures peuvent être attaqués et dégradés par les microorganismes du sol.

Symptômes sur les conifères

Contrairement à ce qui se passe dans le cas du soufre, le métabolisme normal ne peut assimiler adéquatement les sels accumulés dans les tissus végétaux, de sorte que les dommages sont rapides. Les jeunes aiguilles et celles agées d'un an sont les premières à se décolorer sous l'effet toxique du sel. L'intensité de la décoloration (rose pâle à magenta intense) dépend de la quantité de chlorure accumulée dans les tissus. Chez les conifères, les symptômes commencent à se manifester à l'extrémité des aiguilles pour s'étendre ensuite progressivement vers la base.

Le houppier des arbres touchés par des déversements d'eau salée prend éventuellement une teinte brun rougeâtre ou magenta (fig. 143 et 144). Les symptômes apparaissent d'abord près de la cime et progressent graduellement vers le bas. Chez l'épinette, les jeunes aiguilles et celles âgées d'un an deviennent d'abord chlorotiques puis brunissent (fig. 145), pour tourner ensuite au brun rougeâtre ou au magenta (fig. 144 et 146). Si les concentrations de sel dans le sol sont très élevées, même les aiguilles plus vieilles, chez lesquelles l'accumulation est beaucoup plus lente deviennent affectées.

Chez le pin, les symptômes sur les aiguilles sont similaires (fig. 147 et 148) à ceux observés chez l'épinette. Si l'absorption de chlorure est faible, il est possible que les bourgeons ne soient pas attaqués et puissent s'épanouir à la prochaine saison de croissance. Par contre, si les concentrations demeurent élevées dans le sol, le nouveau feuillage présentera des symptômes d'endommagement à partir de la pointe des aiguilles (fig. 149).

Les dommages au cambium des branches et de la tige sont fréquents après les déversements d'eau salée (fig. 150). Le chlorure semble s'y accumuler, ainsi que dans les tissus adjacents, ce qui nuit au transport de l'eau et entraîne finalement la mort de l'arbre.

Symptômes sur les feuillus

En général, les effets de l'intoxication par le sel se manifestent beaucoup plus rapidement chez les feuillus que chez les conifères. Chez le bouleau, le premier symptôme externe est une chlorose de l'extrémité et des bords des feuilles, qui progresse rapidement vers l'axe central (fig. 151). Lorsque l'intoxication est grave, la chlorose s'intensifie jusqu'à la nécrose (fig. 152 et 153). Chez le peuplier faux-tremble, l'extrémité et les marges des feuilles deviennent d'abord légèrement chlorotiques puis prennent une couleur vert foncé, ce qui leur donne un aspect trempé (fig. 154). À mesure que l'intoxication progresse, les zones atteintes tournent au jaune vif (correspondant aux zones d'accumulation de sel) puis se nécrosent (fig. 155) et s'enroulent (fig. 156). Ces symptômes sont souvent suivis d'une chute prématurée des feuilles. De fortes concentrations de sel peuvent également tuer les bourgeons et le cambium, empêchant toute nouvelle croissance l'année suivante. Les arbres morts d'intoxication par le sel sont fréquents dans les zones ayant subi des déversements d'eau salée.

La teinte automnale normale des feuillus peut ressembler à celle causée par le sel. Chez certains feuillus, le feuillage tué par le sel peut rester sur les branches pendant l'hiver alors qu'après la sénescence automnale normale, les feuilles produisent une assise de séparation et tombent.

Autres espèces

Les plantes supérieures, les lichens et les bryophytes qui forment la couverture végétale sont également exposés à l'intoxication par l'eau salée et présentent des symptômes qui ressemblent à ceux qu'on vient de décrire sur les feuillus. Des déversements importants peuvent causer l'apparition d'une teinte brune ou brun rougeâtre chez presque toutes les plantes de la couverture vivante (fig. 157 et 158).

Grâce à leur situation, les lichens vivant sur le tronc et les branches des arbres sont épargnés des effets directs de la salinité et se développent assez normalement sur les arbres morts. Par contre, les lichens et les bryophytes du sol peuvent être gravement atteints. De fait, le déplacement de l'eau salée dans une forêt peut souvent être déterminé d'après l'atteinte des plantes de la couverture vivante, étant donné que les matières déversées s'écoulent en suivant les dénivellations du terrain et, qu'après avoir pénétré dans le sol, les ions chlorure ne se dispersent pas latéralement de façon importante. Cette assertion se vérifie particulièrement dans le cas des sols argileux.

Lectures suggérées

Alberta Environment & University of Calgary. 1975. *Conference on the environmental effects of oil and salt water spills on land.* Banff, Alberta. Nov. 6–7, 1975.

Foster, A.C., M.A. Maun & D.P. Webb. 1978. *Effects of road salt on eastern white cedar.* Environnement Canada, Service canadien des forêts, Centre de recherches forestières des Grands lacs. Sault Sainte-Marie (Ontario). Rapport d'information 0–X–277.

Autres émissions

Soufre élémentaire

Dans l'Ouest canadien, le soufre est souvent présent en quantités appréciables dans les gisements d'hydrocarbures et de minéraux. Ainsi, le gaz naturel (sauf celui des gisements de l'Arctique), le pétrole des gisements ordinaires et des sables bitumineux, le charbon et divers minerais en contiennent. Le charbon de l'Ouest en renferme moins que celui des gisements de l'Est. Au cours des processus d'extraction et de raffinage, on récupère normalement le soufre en fusion qui est ensuite solidifié à l'état élémentaire et conservé en gros blocs.

Les particules de soufre libérées des blocs solidifiés et les poussières produites lors du chargement dans les wagons peuvent nuire à la végétation et aux sols environnants. La pluie ne peut pas dissoudre les blocs car le soufre élémentaire est très insoluble dans l'eau. Cependant, l'oxydation bactérienne à la surface de ces blocs peut produire des composés hydrosolubles qui sont charriés par l'eau de ruissellement vers les régions voisines. Le pH de cette eau et des eaux réceptrices à proximité peut être très acide (pH 2–3) et avoir un effet nocif sur la végétation et la chimie du sol. De plus, au cours de leur déplacement dans le sol, les substances acides peuvent solubiliser divers éléments, comme l'aluminium et le magnésium, qui par eux-mêmes peuvent être phytotoxiques.

Normalement, le ruissellement acide affecte surtout la végétation des bas terrains. Dans la forêt boréale, il s'agit des peuplements d'épinette noire et de mélèze laricin. Chez les conifères exposés à des poussières de soufre élémentaire ou à des eaux très acides, on observe la chlorose (fig. 159 et 160) et la défoliation prématurée (fig. 160), symptômes similaires à ceux du SO_2 comme on l'a vu précédemment.

Les plantes de la couverture vivante à racines peu profondes sont très sensibles à un excès de soufre et à une forte acidité et sont souvent les premières à manifester des symptômes d'intoxication. Les terrains bas situés à proximité de tas de soufre sont souvent recouverts d'une couche jaune de soufre élémentaire qui peut causer de sérieux dommages à la couverture vivante (fig. 161). Le captage des poussières de soufre ainsi que l'endiguement et le traitement des eaux de ruissellement provenant des tas de soufre peuvent être des moyens efficaces de réduire au minimum les dommages à la végétation.

Fosses de brûlage et éruptions de puits

Les fosses de brûlage et les éruptions de puits de gaz naturel et de pétrole constituent d'autres sources importantes d'émission dans l'atmosphère par l'industrie du pétrole et du gaz. Les effluents qui s'en dégagent peuvent renfermer un mélange de composés phytotoxiques, ordinairement des gaz soufrés, des hydrocarbures et de l'eau saline. Les matières émises lors de l'éruption d'un puits le sont sous une pression considérable et peuvent parfois prendre feu, ce qui transforme l'hydrogène sulfuré en SO_2.

Les dommages à la végétation varient de légers (réversibles) à graves (irréversibles). Les dommages légers sont dus au dépôt d'une fine couche d'hydrocarbures sur le feuillage, à des éruptions sans incendie ou à des incidents survenant en hiver lorsque la végétation est en majeure partie en état de dormance. Les dommages sont graves en cas d'émissions de grande envergure pendant la saison de croissance active ou lors d'éruptions donnant lieu à un incendie qui transforme l'hydrogène sulfuré en une forme plus phytotoxique, le SO_2.

Les émissions continues (SO_2 et produits de la combustion incomplète des hydrocarbures) des fosses de brûlage au voisinage de groupes importants de puits de pétrole peuvent endommager gravement la végétation forestière voisine (fig. 162). La direction et la vitesse des vents dominants influent sur le type de ces dégâts. Aux endroits où se produisent des émissions au niveau du sol, les peuplements à l'état de gaules et la couverture vivante subissent un choc mortel. Les symptômes sur la végétation (fig. 163 et 164) ressemblent à ceux du SO_2 précédemment décrits (pages 00 à 00). Dans ces endroits il faut tout d'abord examiner les lichens des branches, qui sont les indicateurs les plus sensibles de la pollution par le SO_2, puisqu'étant ordinairement les premières plantes à accuser des symptômes d'endommagement.

Brouillards acides

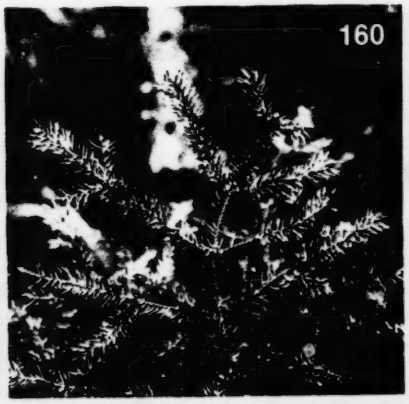
Il arrive parfois que l'anhydride sulfureux et les oxydes d'azote émis par l'industrie du pétrole et du gaz réagissent avec l'humidité de l'air pour former un brouillard acide. Lorsque des poussées accidentelles de gaz surviennent dans les puits de pétrole et de gaz, l'acide chlorhydrique utilisé pour dissoudre certaines formations calcaires et parfois pour nettoyer les puits peut être libéré dans l'atmosphère et former un brouillard susceptible d'endommager la végétation et les sols. Les acides peuvent causer des lésions à la surface des feuilles ou pénétrer à l'intérieur de celles-ci par la cuticule et les stomates, entraînant ainsi la dissolution du mésophylle dont l'importance est vitale, ainsi que d'autres tissus.

Chez les conifères, l'apparition de taches chlorotiques aux points de contact (fig. 165) constitue l'un des premiers symptômes des effets de l'exposition au brouillard acide. Il peut rapidement se développer en ces points une nécrose des tissus qui prennent alors une teinte brune (fig. 166). Chez les feuillus, un brouillard d'acide sulfurique peu concentré peut causer une légère décoloration des tissus foliaires (fig. 167 et 168).

Stress provoqués par les polluants — Industrie du gaz naturel et du pétrole. Symptômes des effets d'autres émissions (soufre élémentaire, fosse de brûlage, éruption de puits et brouillard acide) sur la végétation forestière (fig. 159 à 172).

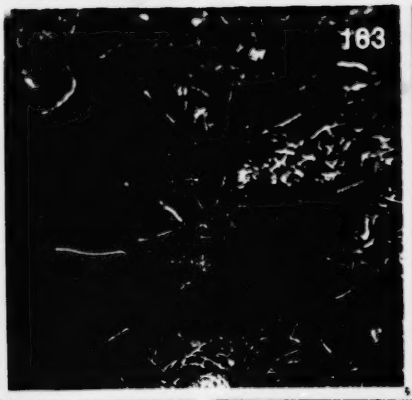
Soufre élémentaire : Fig. 159 Symptômes de chlorose chez l'épinette noire, provoqués par l'eau de ruissellement fortement acide provenant de tas de soufre. **Fig. 160** Jaunissement avancé du jeune feuillage d'une épinette blanche et début de défoliation prématurée. **Fig. 161** Plantes de la couverture vivante (graminées et arbrisseaux) tuées par l'eau de ruissellement acide provenant de tas de soufre. **Fosse de brûlage et éruption de puits : Fig. 162** Conifères tués par le soufre et d'autres émanations gazeuses de la fosse de brûlage apparaissant à l'avant-plan. **Fig. 163** Feuillage d'un semis d'épinette blanche endommagé par les émanations provenant de l'incendie d'un puits en éruption. **Fig. 164** Semis de pin tué par les émanations provenant de l'incendie d'un puits en éruption. **Brouillard acide : Fig. 165** Aiguilles de pin décolorées par des gouttelettes d'acide chlorhydrique. À remarquer la localisation des lésions aux points de contact. **Fig. 166** Symptômes provoqués par un brouillard d'acide chlorhydrique sur l'épinette blanche. **Fig. 167** Léger blanchiment d'une feuille de peuplier faux-tremble causé par un brouillard d'acide sulfurique peu concentré. **Fig. 168** Légère décoloration d'une feuille de peuplier faux-tremble, sur laquelle on peut répérer des gouttelettes d'acide sulfurique. **Fig. 169** Dommages causés par l'acide chlorhydrique sur une feuille de peuplier aux point de contact. **Fig. 170** Gros plan montrant les lésions causées par l'acide chlorhydridique sur une feuille de peuplier aux points de contact. **Fig. 171** Enroulement du nouveau feuillage d'un bouleau suite à une retombée d'acide chlorhydrique peu concentré. **Fig. 172** Gros plan montrant la décoloration d'une feuille de bouleau par l'acide chlorhydrique. La feuille enroulée a été redressée pour faire voir les dommages.

159


160

161

162


163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

Des gouttelettes très acides peuvent provoquer la formation rapide de taches nécrotiques aux points de contact (fig. 169 et 170). Le jeune feuillage semble très sensible aux brouillards fortement acides qui en provoquent la dessiccation et la nécrose et souvent la torsion (fig. 171 et 172).

Lectures suggérées

Jacobson, J.S. & A.C. Hill (eds.). *Recognition of air pollution injury to vegetation : A pictorial atlas.* Air Pollution Control Association. Pittsburgh, Pennsylvania. Informative Report 1.

United States Department of Agriculture. 1973. *Air pollution damages trees.* Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Mines et fonderies de métaux

La croissance constante du secteur des mines et fonderies de métaux non précieux risque d'engendrer des quantités considérables de polluants atmosphériques pouvant endommager les écosystèmes forestiers du Nord. Comme les gisements de nickel, de cuivre et de zinc de l'Ouest canadien se présentent sous forme de sulfures, la fusion et d'autres procédés métallurgiques employés libèrent dans l'atmosphère des quantités considérables de SO_2, d'éléments à l'état de traces, comme le zinc, le cuivre, le nickel, le plomb, l'arsenic, le mercure et le cadmium, de même que d'autres matières particulaires.

Les particules de métaux lourds agissent sur la végétation en formant une pellicule à la surface des feuilles ou en étant retenues par la cuticule et les stomates. Les matières ainsi retes s'éliminent difficilement par lavage à l'eau et peuvent nuire aux échanges gazeux, à l'accès à la lumière, à la photosynthèse et à la transpiration. De plus, les métaux lourds sous forme d'aérosols peuvent être absorbés par le feuillage.

Les dommages causés par les émissions des fonderies sont généralement assez différents de ceux attribuables au SO_2 seul. À proximité des sources, les polluants métalliques provoquent des lésions ou des taches à la surface des aiguilles. Les dommages sont plus évidents du côté faisant face à la source.

L'action combinée de certains métaux lourds et du SO_2 sur la végétation et la chimie du sol peut être cumulative ou synergique. Dans les sols, l'acidité apportée par le SO_2 peut rendre solubles de nombreux métaux lourds, qui normalement sont liés à la matière organique de la surface du sol sous forme de chélates, et les rendre ainsi encore plus assimilables par la végétation et susceptibles de nuire à des processus métaboliques essentiels.

Le soufre naturel s'intègre normalement dans l'écosystème forestier, ainsi que le soufre apporté par la pollution. Les métaux lourds, par contre, s'accumulent car ils ne sont pas biodégradables. Même si à l'état de traces, certains métaux sont essentiels, le moindre excès peut être toxique.

Un traitement chimique comme le chaulage est un moyen assez économique de rendre productif un sol rendu stérile par un apport excessif de soufre. Les zones exposées à des émissions non dépolluées de fonderies subissent une rapide désertification difficilement réversible. Le chaulage permet de réduire la toxicité des sols en rendant les métaux lourds moins assimilables par les plantes.

Phytotoxicité

Sur la végétation forestière, les effets des émissions des fonderies renfermant du SO_2 et des métaux lourds peuvent être immédiats et aigus ou à long terme et chroniques, selon la concentration et la nature des polluants. D'autre part, la réaction des essences forestières peut être individuelle ou globale (au niveau de la population). Elle est individuelle, cas le plus fréquent, lorsque les concentrations sont relativement faibles, et globale lorsque les émissions atteignent des niveaux très toxiques.

Les espèces réagissent différemment à une augmentation des émissions d'une fonderie et n'ont pas la même aptitude à développer une tolérance. En général, la restauration de la couverture végétale dans les zones contaminées par les métaux lourds est fonction de l'évolution des espèces tolérantes. Cette tolérance peut être due à l'aptitude des plantes à éviter les métaux présents dans l'environnement ou à une résistance réelle au niveau des processus métaboliques.

Symptômes dans un peuplement d'épinettes

En général, les émissions peu concentrées des fonderies réduisent la croissance et le rendement sans produire de symptômes visibles pendant plusieurs années. À fortes concentrations, même de façon intermittente, elles peuvent causer des dommages évidents (fig. 173). Au début les dommages se limitent à certains points et ne peuvent être facilement détectés du haut des airs. Dans une zone forestière affichant un dépérissement partiel, on observe la chlorose du feuillage des conifères (fig. 174), puis la chute prématurée des aiguilles. L'exposition fréquente à de fortes concentrations de polluants peut provoquer des symptômes de dommages aigus, comme la chlorose, la nécrose et la chute prématurée des aiguilles dans toute la zone polluée (fig. 175). De nombreuses années d'exposition à des émissions de niveau toxique peuvent entraîner la dénudation complète de la zone (fig. 176). Près de Sudbury, en Ontario, les sols ont été rendus toxiques par les métaux lourds et acides par le SO_2, de sorte que le rétablissement de la végétation forestière est devenu impossible, du moins non économique.

Chez l'épinette, les symptômes d'intoxication commencent toujours à paraître sur le vieux feuillage. Toutefois, si les branches basses sont protégées par la neige en hiver, ces symptômes seront plus graves sur les branches supérieures (fig. 177) directement exposées aux émissions pendant toute l'année. Sur les aiguilles plus vieilles, la chlorose et la nécrose apparaissent d'abord à l'extrémité puis s'étendent progressivement vers la base (fig. 178 et 179). Comme les jeunes aiguilles ont une activité métabolique plus grande, elles peuvent assimiler plus de SO_2 que les plus vieilles avant l'apparition des symptômes d'intoxication. Les jeunes semis gravement exposés deviennent aussi chlorotiques que les plus vieux et finalement meurent (fig. 180).

L'épinette noire résiste généralement mieux aux émissions des fonderies que l'épinette blanche, mais elle affiche une chlorose et une défoliation généralisées lorsqu'elle est exposée à des concentrations toxiques pendant une longue période (fig. 181). Les dommages sont plus graves du côté de l'arbre exposé aux vents dominants (fig. 182), les symptômes de chlorose apparaissant d'abord sur les plus vieilles aiguilles de ce côté (fig. 183). À mesure que ces symptômes s'intensifient, il apparaît à l'extrémité des aiguilles une nécrose qui s'étend progressivement (fig. 185 et 186). Les aiguilles tombent prématurément, et même les plus jeunes présentent certains symptômes (fig. 184). Aux endroits où la contamination par les métaux lourds a atteint le sol minéral ou la zone des racines, la chute prématurée des aiguilles et les symptômes d'intoxication s'observent couramment même sur les pousses de l'année (fig. 187). Celles-ci deviennent rabougries et chlorotiques avant de tomber.

Les lichens épiphytes peuvent absorber le soufre du SO_2 et de grandes quantités d'éléments à l'état de traces. Aux endroits souvent exposés aux émissions d'une fonderie, ces polluants peuvent pratiquement éliminer les populations de lichens épiphytes et n'en laisser que quelques survivants (fig. 188).

Symptômes dans un peuplement de pins

Le pin tordu latifolié et le pin gris sont plus sensibles aux émissions des fonderies que l'épinette blanche et l'épinette noire. Dans les forêts de pins, les détériorations du feuillage sont assez fréquentes aux endroits fréquemment exposés à de telles émissions, encore que les arbres y réagissent différemment (fig. 189). Les pins gravement exposés pendant une longue période de temps présentent des symptômes d'endommagement aigu (fig. 190), avec un début de nécrose aux extrémités des aiguilles (fig. 191 et 192). Comme chez l'épinette, la nécrose s'étend progressivement vers la base des aiguilles puis celles-ci tombent prématurément. La nécrose est en majeure partie attribuable au degré d'exposition au SO_2.

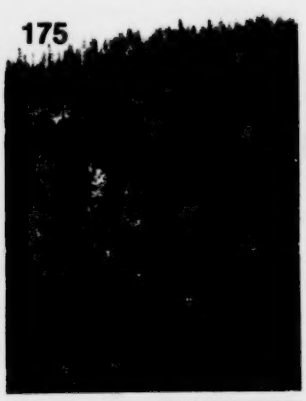
Si l'exposition n'est pas assez importante pour tuer les bourgeons, les arbres débourreront le printemps suivant. Toutefois, les aiguilles plus âgées, en raison de leur plus grande sensibilité ou d'une plus longue période d'exposition, peuvent présenter une forte décoloration et, éventuellement, tomber (fig. 193 et 194). Certaines aiguilles affichent des bandes irrégulières de décoloration attribuables aux effets combinés du SO_2 et des métaux lourds (fig. 195).

Stress provoqués par les polluants — Mines et fonderies de métaux. Symptômes des effets des émissions des fonderies de nickel, de cuivre et de zinc dans un peuplement d'épinettes (fig. 173 à 188).

Fig. 173 Dépérissement général de la forêt. **Fig. 174** Dépérissement partiel d'un peuplement forestier par suite d'émissions de gaz soufrés (SO_2) et de métaux lourds. **Fig. 175** Dépérissement grave d'un peuplement forestière exposé à des concentrations aiguës de SO_2 et à des particules de métaux lourds. **Fig. 176** Disparition de la forêt et de la couverture végétale au voisinage immédiat d'une fonderie. **Fig. 177** Défoliation grave des branches supérieures d'une épinette blanche et décoloration des branches inférieures. **Fig. 178** Décoloration grave des extrémités des aiguilles de l'épinette blanche. **Fig. 179** Aiguilles d'épinette blanche présentant des lésions. Les symptômes commencent à paraître à l'extrémité des aiguilles et s'étendent ensuite vers la base. **Fig. 180** Nécrose totale d'un semis d'épinette blanche dans une zone fortement contaminée. **Fig. 181** Décoloration grave du feuillage d'une épinette noire. **Fig. 182** Feuillage d'une épinette noire gravement endommagé du côté faisant face à une fonderie. **Fig. 183** Décoloration du vieux feuillage d'une épinette noire, premier symptôme d'endommagement. **Fig. 184** Intensification des symptômes sur le vieux feuillage d'une épinette noire et chute prématurée des aiguilles. **Fig. 185** Début de nécrose aux extrémités des aiguilles d'une épinette noire par suite d'exposition aux émissions fortement concentrées d'une fonderie. **Fig. 186** Intensification des symptômes nécrotiques sur une épinette noire et chute prématurée des vieilles aiguilles. **Fig. 187** Perte d'aiguilles et dommages graves aux aiguilles de l'année sur une épinette noire, indiquant une contamination probable du sol. **Fig. 188** Lichens arboricoles morts ou très dégradés dans une zone fortement polluée par les émissions d'une fonderie.

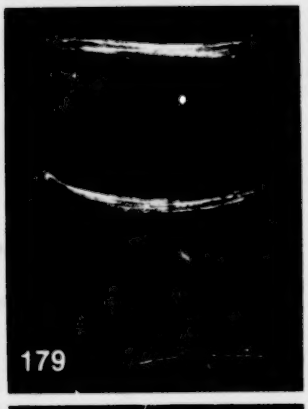
173

174


175

177

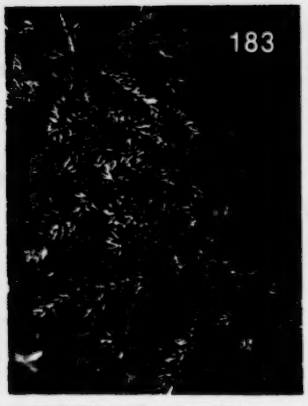
178


179

180

181

182


183

184

185

186

187

188

Si l'exposition se poursuit après la sortie des bourgeons au printemps, la nouvelle pousse est rabougrie, chlorotique et nécrotique. La croissance irrégulière des aiguilles du pin, fréquemment observée dans les zones polluées autour des fonderies, est due à des périodes d'exposition intense à divers stades de développement des aiguilles. À faible distance, les émissions produisent des lésions ou des marbrures sur les aiguilles (fig. 196 à 198).

À proximité des fonderies, les lichens vivant sur les branches et le tronc des pins sont sujets à une grave détérioration (fig. 201). Comme ils sont directement exposés aux émissions, ils sont beaucoup plus sensibles aux polluants atmosphériques que les lichens du sol.

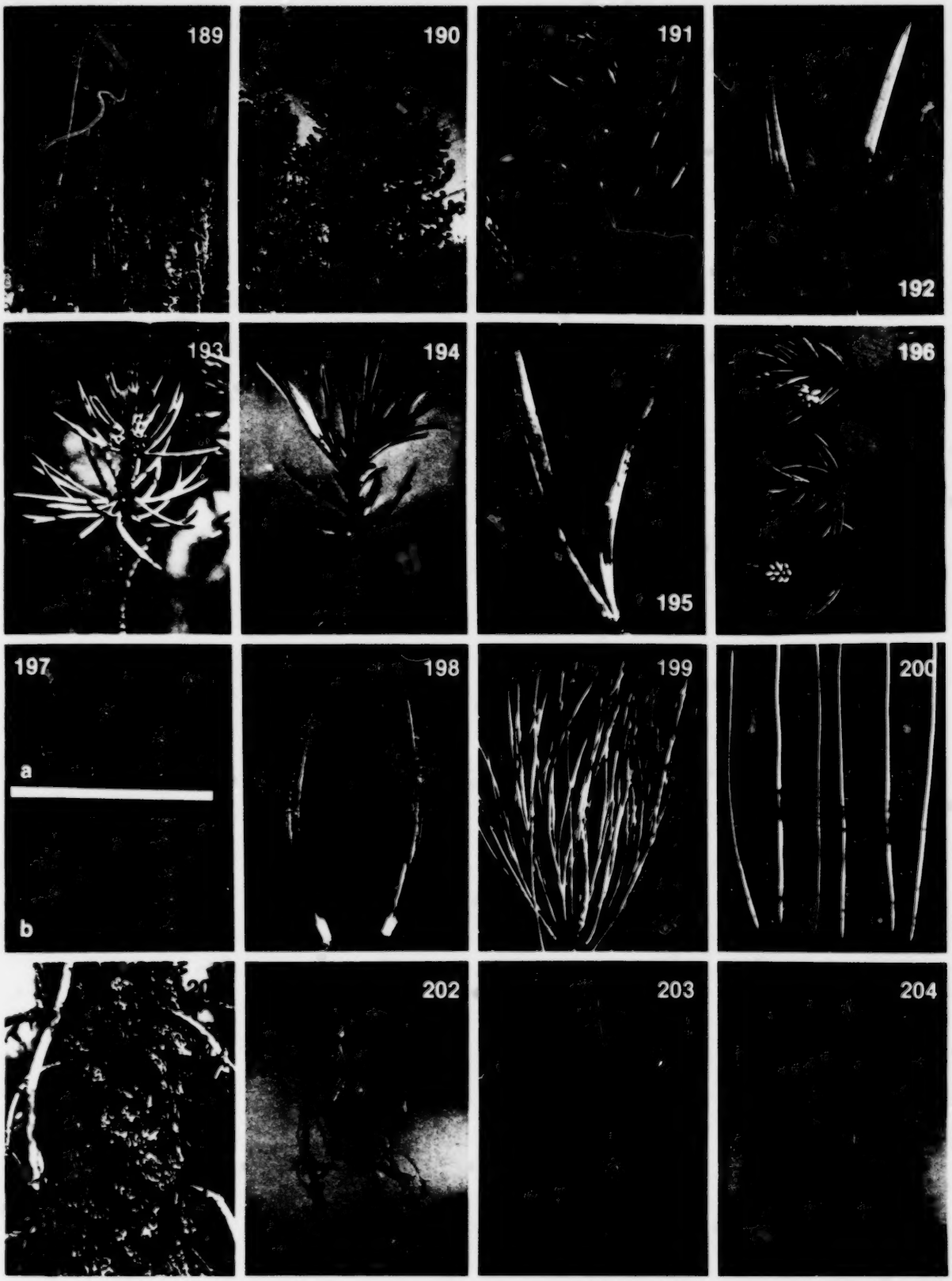
Les sols fortement contaminés par les émissions des fonderies sont également peu propices à la croissance végétale. À la figure 202, on peut voir le système racinaire assez long d'un semis de pin. Dans les sols contaminés, le système racinaire des semis est invariablement rabougri et comporte peu ou pas de racines secondaires (fig. 203 et 204). Cela est particulièrement vrai pour les espèces à racines peu profondes, qui se trouvent en contact direct avec les effluents dans les couches supérieures du sol. Le mauvais développement des racines dû à la toxicité d'éléments à l'état de traces dans le sol empêche toute régénération des espèces forestières.

Émissions de fluorures

Dans les zones forestières exposées à de fortes concentrations atmosphériques de fluorures provenant des fonderies d'aluminium et de l'industrie du phosphore et des engrais, les aiguilles des pins peuvent présenter à leur extrémité des brûlures spectaculaires qui s'étendent rapidement vers la base (fig. 199 et 200). Les dommages se manifestent d'abord sur les jeunes tissus ou sur les aiguilles de l'année par une chlorose aux extrémités, qui leur donne plus tard une couleur brun roux. Les vieilles aiguilles des conifères résistent mieux aux ravages des fluorures. Parfois, on observe des bandes de décoloration grave à des intervalles irréguliers (fig. 200). D'autre part, il a été démontré qu'à des niveaux peu élevés (concentrations chroniques), les émissions de fluorures réduisent la durée de rétention des aiguilles agées de deux ans chez l'épinette noire et l'épinette blanche.

Stress provoqués par les polluants — Mines et fonderies de métaux. Symptômes des effets des émissions des fonderies de nickel, de cuivre et de zinc dans un peuplement de pins (fig. 189 à 198 et 201 à 204). Les figures 199 et 200 font voir des symptômes attribuables aux émissions de fluorures (fonderie d'aluminium). Les semis des figures 202 à 204 ont été cultivés en serre dans un sol contaminé ou non par des métaux lourds, prélevé in situ.

Fig. 189 Houppiers de pins sous stress. À remarquer les différences de sensibilité entre les arbres. **Fig. 190** Dommages graves chez le pin causés par l'exposition au SO_2. **Fig. 191** Symptômes aigus des effets de l'exposition au SO_2 sur les aiguilles du pin, montrant une nécrose qui se développe à partir des extrémités. **Fig. 192** Gros plan des dommages aigus causés par le SO_2 sur les aiguilles de pin. **Fig. 193** Chlorose provoquée chez le pin par des expositions fréquentes aux émissions d'une fonderie. **Fig. 194** Symptômes des effets d'une exposition irrégulière aux polluants sur un semis de pin : croissance inégale des aiguilles. **Fig. 195** Gros plan d'aiguilles de pin montrant des bandes de décoloration à des degrés variés. **Fig. 196** Différences d'intensité des dommages chez le pin. La branche comptant le moins d'aiguilles a été prélevée près de la fonderie tandis que celle en comptant le plus provient d'un endroit plus éloigné. Les lésions sont attribuables aux métaux lourds. **Fig. 197** Marbrures orientées sur des aiguilles de pin a) du côté face à la cheminée; b) du côté opposé à la cheminée. **Fig. 198** Gros plan d'aiguilles mouchetées de pin apparaisant à la figure 197(a). **Fig. 199** Symptômes d'endommagement par les fluorures (fonderie d'aluminium) sur le feuillage d'un pin. À remarquer la décoloration grave des extrémités des aiguilles. **Fig. 200** Symptômes d'endommagement par les fluorures (fonderie d'aluminium) sur des aiguilles de pin. Les symptômes apparaissent d'abord aux extrémités des aiguilles (fig. 199). Les symptômes de décoloration par bandes indiquent des dommages plus graves. **Fig. 201** Dégradation et raréfaction des lichens arboricoles sur un pin. **Fig. 202** Semis de pin indemne à système racinaire complètement développé. **Fig. 203** Semis de pin endommagé, cultivé dans un sol contaminé par des métaux lourds, présentant des racines rabougries et très peu développées latéralement. **Fig. 204** Semis de pin mort ayant été cultivé dans un sol contaminé par des métaux lourds. À remarquer le défaut d'allongement et de développement latéral des racines.


189
190
191
192
193
194
195
196
197
a
b
198
199
200
202
203
204

Symptômes dans un peuplement feuillu

En général, les symptômes de dommages attribuables aux émissions des fonderies apparaissent beaucoup plus rapidement chez les feuillus comme le bouleau, le peuplier faux-tremble et le peuplier que chez les conifères. Néanmoins, les feuillus sont moins sujets à des dommages graves parce que la durée de rétention du feuillage, ou d'exposition, n'est que de 4 à 6 mois comparativement à 4 à 6 ans pour les conifères.

Le bouleau est généralement le plus sensible des feuillus. Les émissions passablement concentrées des fonderies lui infligent invariablement des dommages aigus qui se manifestent par une importante décoloration du feuillage (fig. 205). Un aspect mouillé et une légère chlorose entre les nervures et au bord des feuilles précèdent généralement l'apparition des symptômes d'intoxication grave. À la suite de plusieurs expositions aux fluorures, les feuilles se nécrosent et tombent prématurément (fig. 206). Sur la figure 207 on peut voir des feuilles présentant des symptômes de nécrose.

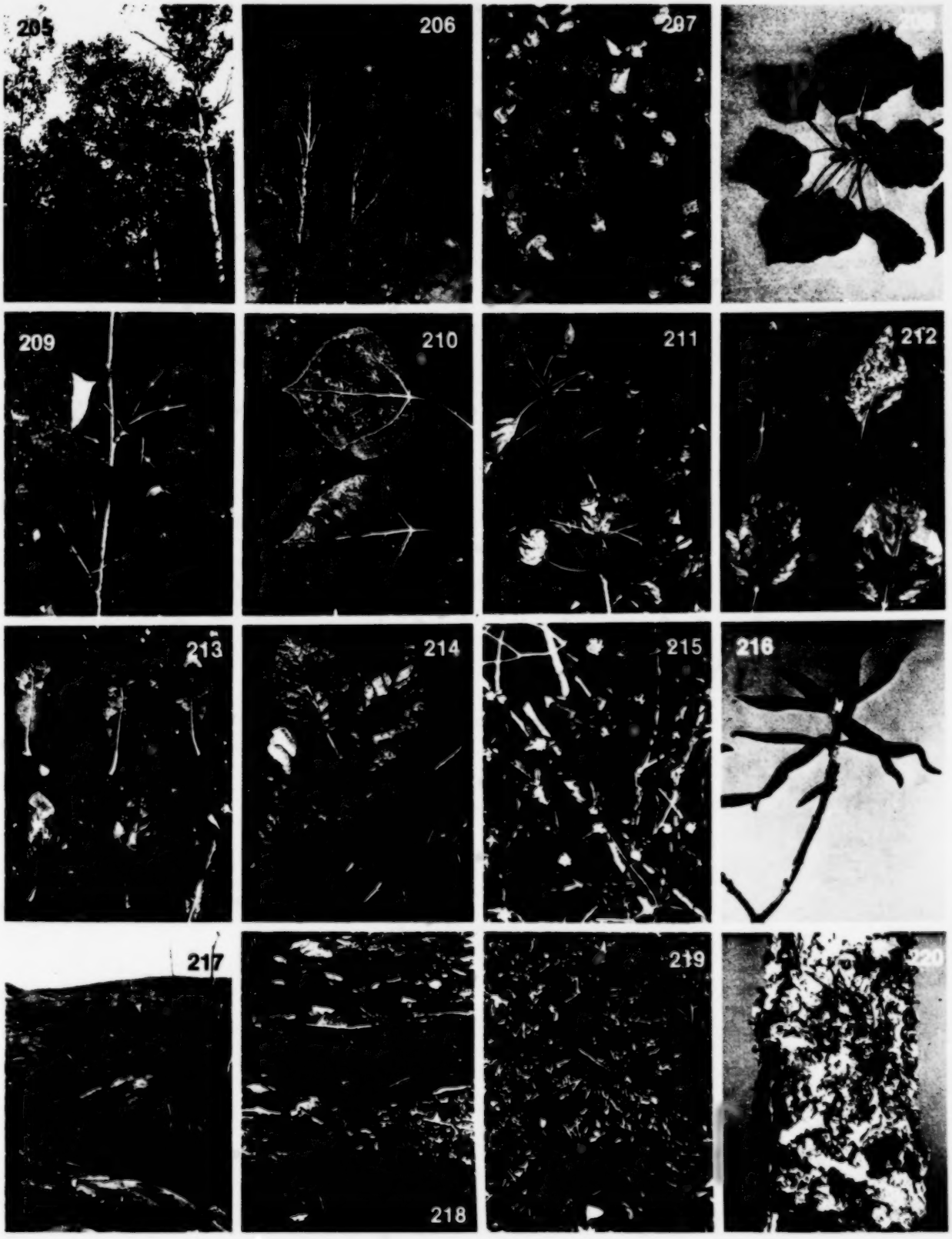
Le feuillage du peuplier faux-tremble réagit aux émissions des fonderies d'abord par une chlorose internervaire (fig. 208). Dans les cas d'expositions répétées, il y a nécrose des tissus (fig. 209 et 210). Le peuplier réagit de la même façon que le bouleau et le peuplier faux-tremble (fig. 211 et 212). La nécrose entraîne un dessèchement prononcé des feuilles qui deviennent fragiles et tombent. Comme les polluants atmosphériques tels que le SO_2 et les métaux lourds n'induisent pas la formation d'une assise de séparation, même les feuilles nécrotiques sèches restent longtemps attachées aux branches. Grâce à leurs écailles protectrices, les bourgeons ne sont pas endommagés par une exposition occasionnelle plus ou moins grave ou une exposition répétée de faible intensité, et ils s'épanouissent à la prochaine saison de croissance. Une seule exposition de forte intensité au cours de l'éclosion printanière des bourgeons n'affecte que les feuilles complètement épanouies, et il n'y a aucun effet appréciable sur le feuillage subséquent (fig. 211).

Sur les feuilles de saule, les symptômes de chlorose et de nécrose tendent à se manifester de façon irrégulière (fig. 213). Toutefois, le saule est moins sensible aux émissions des fonderies que le bouleau, le peuplier faux-tremble, le peuplier et l'aulne. Chez cette dernière essence, il se produit une décoloration marginale et internervaire (fig. 214).

À long terme, les plantes supérieures de la couverture végétale, dont les racines sont peu profondes et se trouvent donc en contact direct avec les éléments toxiques accumulés dans la couche organique superficielle, sont soit tuées, soit gravement endommagées par les émissions des fonderies. Le lédon du Groenland, une de ces espèces les plus vulnérables, accuse des zones nécrotiques aux extrémités des feuilles (fig. 215), qui s'étendent progressivement jusqu'à la tige. L'apparition de ces symptômes sur le feuillage de l'année est précédée de la chute prématurée des feuilles des années précédentes (fig. 216).

Stress provoqués par les polluants — Mines et fonderies de métaux. Symptômes des effets des émissions des fonderies de nickel, de cuivre et de zinc dans une forêt feuillue (fig. 205 à 220).

Fig. 205 Symptômes aigus sur le feuillage du bouleau. **Fig. 206** Défoliation partielle du bouleau due à des expositions répétées. **Fig. 207** Chlorose et nécrose internervaires et marginales sur des feuilles de bouleau. **Fig. 208** Chlorose internervaire sur des feuilles de peuplier faux-tremble un jour après leur exposition aux émissions d'une fonderie. **Fig. 209** Nécrose internervaire et marginale chez le peuplier faux-tremble après exposition, en fortes concentrations, aux émissions d'une fonderie. **Fig. 210** Gros plan de la nécrose internervaire chez le peuplier faux-tremble. **Fig. 211** Symptômes apparaissant sur le feuillage d'un peuplier après une seule exposition massive durant l'éclosion des bourgeons. À remarquer l'absence de symptômes sur les feuilles apparues ultérieurement. **Fig. 212** Progression des symptômes chez le peuplier. À remarquer le mode de progression irrégulier des symptômes. **Fig. 213** Symptômes généraux de nécrose sur les feuilles du saule. **Fig. 214** Décoloration internervaire et marginale du feuillage de l'aulne. **Fig. 215** Nécrose des extrémités des feuilles du lédon du Groenland. **Fig. 216** Lésions des feuilles de l'année et perte des feuilles d'un an d'un lédon du Groenland. **Fig. 217** Rochers dénudés et disparition totale des lichens. **Fig. 218** Disparition totale des mousses dans une zone gravement polluée par les émissions d'une fonderie. **Fig. 219** Absence de végétation au sol par suite de contamination grave. À remarquer les aiguilles mortes tombées des arbres atteints. **Fig. 220** Lichens arboricoles gravement dégradés.


205
206
207
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220

Émissions de fluorures

Les fluorures émis par les fonderies d'aluminium et les usines d'engrais provoquent divers symptômes sur les feuillus. Le plus souvent, le feuillage prend un aspect trempé et une teinte vert pâle, puis il apparaît à l'extrémité et au bord des feuilles une nécrose qui s'étend finalement à la feuille entière. Lorsque la concentration de fluorures dans les tissus végétaux dépasse un certain niveau critique, il peut apparaître des taches ou des bandes nécrotiques aux points d'accumulation.

Bryophytes et lichens

Les bryophytes et les lichens sont de bons indicateurs de la pollution imputable aux fonderies. Dans les zones fortement polluées, les affleurements rocheux qui servent normalement de supports aux lichens sont dénudés (fig. 217). De même, des sols qui autrefois étaient abondamment couverts de lichens et de bryophytes se dénudent lorsqu'ils sont exposés à long terme aux émissions des fonderies (fig. 218 et 219). De tels sols deviennent souvent impropres à toute végétation.

Les espèces sensibles de lichens vivant sur le tronc et les branches des arbres accusent un grave dépérissement (fig. 220) et disparaissent après une longue exposition aux émissions des fonderies, même à de faibles concentrations.

Lectures suggérées

Foy, C.D., R.L. Chaney & M.C. White. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology* 29: 511-566.

Hutchinson, T.C. (ed.). 1975. International conference on heavy metal toxicity in the environment — Symposium proceedings. Volume II. Toronto, Ontario. Oct. 21-31, 1975. Institute for Environmental Studies, University of Toronto. Toronto, Ontario.

Jacobson, J.S. & A.C. Hill (eds.). 1970. *Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas.* Air Pollution Control Association. Pittsburg, Pennsylvania. Informative Report 1.

Sidhu, S.S. 1978. Patterns of fluoride accumulation in forest species as related to symptoms and defoliation. Proceedings of the 71st annual meeting of the Air Pollution Control Association. Houston, Texas. Air Pollution Control Association. Pittsburg, Pennsylvania. Paper 78-24-7.

Treshow, M. 1971. Florides as air pollutants affecting plants. *Annual Review of Phytopathology* 9:21-44.

Autres industries minières

Les effluents rejetés dans l'atmosphère par les cimenteries et les industries d'extraction et de raffinage de la potasse et de mise en tas de matières calcaires et siliceuses renferment des particules qui peuvent avoir un effet nocif sur la végétation et les sols.

Cimenteries

La fabrication du ciment Portland comporte l'extraction de roches calcaires, de feldspaths, de schistes et d'argiles. Ces matières sont ensuite concassées, tamisées, mélangées à du gypse et traitées pour former le ciment. La principale émission des usines de traitement consiste dans les poussières de ciment qui s'échappent des fours. Ces poussières renferment des oxydes de calcium, de potassium et de sodium, ainsi que du magnésium, du manganèse et du soufre en quantités plus faibles. L'oxyde de calcium constitue le majeure partie de ces effluents. Étant donné les volumes considérables de matières traitées dans les fours, des dépoussiéreurs électrostatiques extrêmement efficaces sont nécessaires pour réduire les émissions de particules.

Les poussières de ciment peuvent agir sur la végétation de façon directe, indirecte (par contamination des sols) ou des deux façons à la fois. Les particules très fines peuvent se déposer sur les surfaces foliaires (fig. 221 à 223), obstruant les stomates et réduisant la transpiration et les échanges gazeux. La croissance est entravée en raison principalement de la réduction de l'activité photosynthétique. Des expositions prolongées du feuillage peuvent en entraîner la chute prématurée. Cependant, des pluies fréquentes réduisent les effets directs en emportant au moins une partie des poussières ainsi déposées (fig. 223).

Les poussières de ciment peuvent également causer des dommages aux plantes supérieures du sous-étage, aux lichens et aux bryophytes. Le nombre réduit des espèces de la couverture végétale et la raréfaction des lichens du sol et des arbres dans ces régions sont probablement dus aux poussières de ciment.

Les effets indirects sur la végétation sont attribuables à la modification de la chimie du sol. En effet, étant alcalines, les poussières peuvent pousser le pH du sol du côté basique, ce qui favorise la croissance des espèces calciphiles mais limitent celle d'autres plantes, comme les conifères, qui poussent mieux en sols acides. Les gros arbres enracinés profondément ne sont pas attaqués aussi gravement que les jeunes plantes à racines peu profondes. En sols calcaires, les poussières de ciment ont peu ou pas d'effets et ne modifient pas, par conséquent, la composition des espèces végétales qui y poussent normalement.

Lecture suggérée

Treshow, M. 1970. *Environment and plant response.* McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario. Pages 369-373 (dusts).

Industrie de la potasse

En Saskatchewan, l'industrie de l'extraction et du raffinage de la potasse émet en grande quantité des polluants atmosphériques renfermant surtout des chlorures de potassium et de sodium dans le rapport de 3 à 1. Les émissions, sous la forme de particules de sels, proviennent des tas de potasse en séchage durant le processus de raffinage. On peut voir une couche blanche de sels de potassium et de sodium qui s'accumule parfois sur le sol (fig. 224) autour des installations de traitement. En général, la végétation y est absente ou peu abondante. Des déversements d'eau salée sont également assez fréquents.

La phytotoxicité serait principalement attribuable à un excès des ions chlorure, sodium et potassium. En général, les feuillus semblent plus sensibles aux chlorures que les conifères, comme on l'a déjà souligné à la page 32, en raison pro-

bablement d'une accumulation plus rapide de ces sels à des niveaux toxiques dans leurs tissus. Établi d'après des observations sur le terrain et des analyses élémentaires d'échantillons de la végétation prélevés dans le centre de la Saskatchewan, le tableau suivant montre la sensibilité relative des principales essences aux émissions salines.

La chlorose internervaire et marginale (fig. 225 et 226) est un des symptômes directement attribuables aux émissions salines. Lorsque l'accumulation de sels est élevée, ces symptômes sont suivis par l'apparition de tissus nécrotiques aux marges (fig. 225, 227 et 228) et par la chute prématurée des feuilles (fig. 229). Le dépérissement de l'extrémité des branches (fig. 229) entraîne la prolifération des bourgeons latéraux et la formation de structures ressemblant à des balais (fig. 229 et 230).

Tableau 2. Sensibilité des espèces aux émissions salines de l'industrie de la potasse

Espèces	Sensibilité
Érable négondo	élevée
Peuplier	élevée
Caragana	élevée
Saule	modérée
Orme (d'Amérique)	modérée
Pin sylvestre	faible
Épinette du Colorado	faible

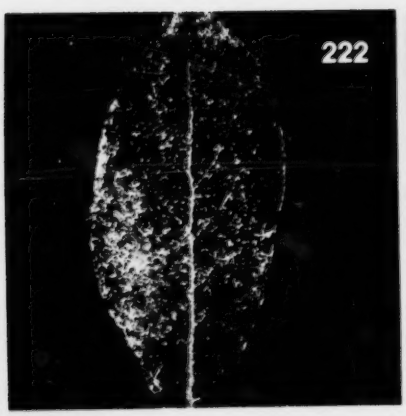
Tas de matières calcaires

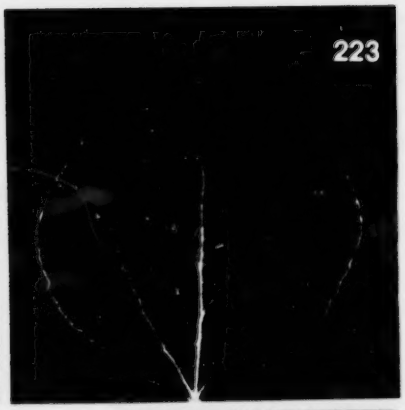
Des dépôts de matières calcaires, siliceuses et autres, généralement sous la forme de particules ou de poudre, sont nécessaires dans le cadre de certaines activités industrielles. Lorsque ces matières sont charriées en quantités assez importantes par le vent ou les eaux de ruissellement vers les zones forestières, elles peuvent y provoquer des intoxications graves chez la végétation. Les intoxications dues aux poussières de gypse charriées par le vent sont courantes. Les dommages observés dans les régions touchées sont principalement attribuables au dépôt d'une couche de gypse ou d'autres matières semblables à la surface des feuilles. Une telle couche, par obstruction des stomates, peut retarder la croissance et finir par tuer la plante (fig. 231 et 232). Les dépôts évidents de matières calcaires ou autres matières semblables sur la tige et le feuillage des arbres situés près des dépôts de stockage (fig. 233 et 234) ne laissent aucun doute quant à la cause du dépérissement de la végétation.

Stress provoqués par les polluants — Autres industries minières. Symptômes des effets des poussières de ciment, des sels et des matières calcaires sur les espèces forestières (fig. 221 à 234).

Poussières de ciment : Fig. 221 Dépôts sur des aiguilles d'épinette blanche. **Fig. 222** Dépôt massif sur une feuille de saule. **Fig. 223** Dépôt sur une feuille de peuplier faux-tremble, partiellement lessivé par les puies. **Sels provenant de l'industrie de la potasse : Fig. 224** Couche de sels de sodium et de potassium à la surface du sol. **Fig. 225** Symptômes de chlorose et de nécrose chez le saule. **Fig. 226** Chlorose internervaire et marginale du feuillage d'un érable négondo. **Fig. 227** Nécrose marginale chez un peuplier faux-tremble. **Fig. 228** Gros plan de la nécrose marginale chez le peuplier faux-tremble. **Fig. 229** Dépérissement apical des branches et prolifération des bourgeons latéraux chez le peuplier faux-tremble. **Fig. 230** Gros plan de la prolifération des bourgeons latéraux causée par le dépérissement apical des branches du peuplier faux-tremble. **Poussières provenant des tas de matières calcaires : Fig. 231** Peuplement forestier tué par le dépôt d'une épaisse couche de gypse. **Fig. 232** Épinette blanche tuée par le dépôt d'une couche de poussières de gypse sur le feuillage et la tige. **Fig. 233** Tige principale d'arbre recouverte d'une couche de matières calcaires. **Fig. 234** Aiguilles d'épinette blanche tuées par le dépôt de poussières de gypse.

221


222


223

224

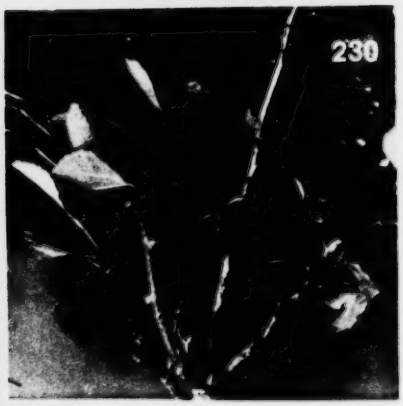
225

226

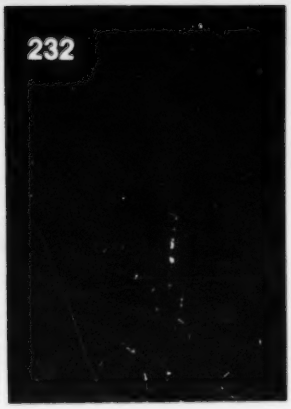
227

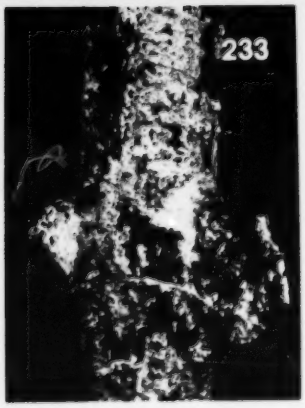
228

229


230

231


232


233

234

Industrie des pâtes et papiers

La conversion chimique des copeaux de bois en fibres cellulosiques, ainsi que le raffinage et le séchage requis pour fabriquer le papier émettent divers polluants atmosphériques selon le procédé employé pour la fabrication de la pâte. Deux méthodes sont normalement employées pour la digestion du bois : le procédé au bisulfite et le procédé kraft. Le premier donne lieu surtout à l'émission de SO_2, tandis que le second libère des quantités appréciables d'hydrogène sulfuré (H_2S), de méthylmercaptan et de sulfure de diméthyle, ainsi que des quantités limitées de SO_2, d'hydroxyde de sodium et d'ammoniac. Le second peut donc poser un plus grave problème de pollution atmosphérique que le premier dans les zones environnantes. Une partie ou la totalité de ces substances peuvent être présentes dans les effluents rejetés, de même que diverses autres produits résultant de leurs interactions. Ainsi, les sels d'ammonium et l'hydroxyde de sodium peuvent réagir pour former un panache, ou une fumée, de couleur bleue. Dans l'Ouest canadien, le procédé kraft est le plus répandu car il convient bien aux conifères de la forêt boréale.

Symptômes sur les lichens

Les effets des émissions des usines de pâtes sur la végétation varient selon la composition des effluents et les types de végétation. Chez les lichens arboricoles, il se présente des symptômes de dégradation analogues à ceux causés par une détérioration naturelle. Il existe trois grands types de lichens arboricoles : les foliacées (ressemblant à des feuilles)(fig. 235 et 237), les fruticuleux (à l'aspect de branches)(fig. 238 et 239) et les crustacés (en forme de croute). À cause de leur très grande surface qui entraîne la fixation de grandes quantités de polluants, les fruticuleux sont les plus sensibles aux émissions industrielles.

On peut voir à la partie supérieure de la figure 235, un lichen foliacé *(Hypogymnia)* à l'état normal. L'exposition aux effluents chargés de H_2S et de SO_2 d'une usine de pâtes entraîne une dégradation partielle ou complète des lichens *(Parmelia* spp.*)* (fig. 236 et 237).

Après exposition continue des lichens fruticuleux, comme *Usnea* spp., aux gaz soufrés émis par les usines de pâtes, leur réseau de fines branches très fonctionnelles (fig. 239a) se dégrade sérieusement (fig. 239b). À ce stade, les lichens perdent leur coloration normale et présentent une apparence compacte (fig. 238 et 239b). La teinte verte visible aux figures 238 et 239b est due à la croissance d'une algue sur les tissus endommagés. Lorsqu'ils sont gravement dégradés, les lichens perdent leur force physique et leur aptitude à s'accrocher aux arbres et il n'en subsiste que quelques vestiges (fig. 188 et 201).

Les lichens normaux du sol, comme l'espèce foliacée de *Peltigera*, deviennent chlorotiques lorsqu'ils sont exposés aux émissions des usines de pâtes (fig. 240). Si l'exposition se poursuit de façon continue, ils brunissent ou se nécrosent puis se désagrègent (fig. 241). En général, on observe une raréfaction des lichens du sol et des arbres dans les zones fortement polluées.

Stress provoqués par les polluants — Industrie des pâtes et papiers. Symptômes des effets des émissions sur la végétation forestière (fig. 235 à 250).

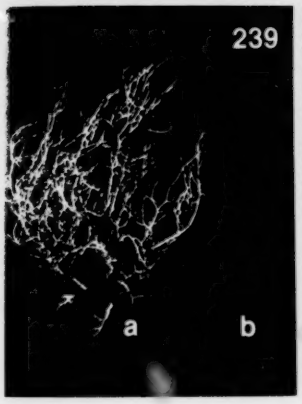
Fig. 235 Aspect normal de lichens arboricoles foliacés (*Hypogymnia* sp. principalement) **Fig. 236** Lichens arboricoles foliacés partiellement dégradés (*Parmelia* sp. principalement). **Fig. 237** Lichens arboricoles foliacés entièrement dégradés (*Parmelia* sp. principalement). À remarquer la teinte légèrement rosâtre, indice de dégradation des lichens. **Fig. 238** Lichens aboricoles fruticuleux dégradés (*Usnea* sp.). **Fig. 239** Exemples de lichens arboricoles fruticuleux (a) normaux et (b) dégradés. **Fig. 240** *Peltigera aphothosa*, lichen foliacé du sol, présentant des symptômes de chlorose. **Fig. 241** Vestiges nécrotiques, flétris et bruns de *Peltigera aphthosa*. **Fig. 242** Pins partiellement défoliés. **Fig. 243** Chlorose et nécrose graves des aiguilles du pin. **Fig. 244** Défaut de croissance et de rétention des aiguilles d'un pin. **Fig. 245** Dommages aigus chez le pin. À remarquer sur les aiguilles les petites taches laissées par les résidus des émissions. **Fig. 246** Chlorose et nécrose progressant de l'extrémité vers la base des aiguilles sur un pin. **Fig. 247** Nécrose des aiguilles d'un an chez un pin, les aiguilles de l'année étant pratiquement indemnes. **Fig. 248** Aiguilles d'un an de pin présentant des bandes de tissus verts et chlorotiques. **Fig. 249** Légère chlorose sur des aiguilles de pin causée par une accumulation de résidus alcalins. **Fig. 250** Gros plan des aiguilles de pin illustrées à la figure 249, montrant une légère chlorose causée par l'accumulation de résidus alcalins.

235

236

237

238


239 a b

240

241

242

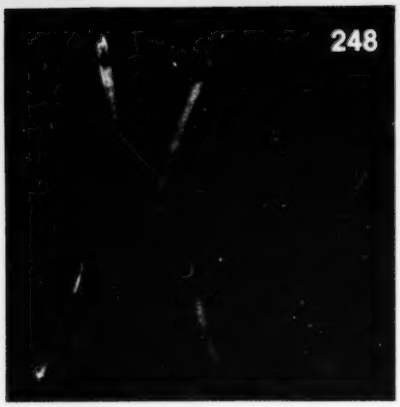
243

244

245

246

247


248

249

250

Symptômes sur les conifères

Dans la région boréale, la plupart des usines de pâtes se trouvent au voisinage de forêts d'épinettes et de pins. Dans le présent chapitre, le pin sert de type pour décrire les symptômes de réaction de tous les conifères aux émissions de ces usines.

Les pins exposés aux émissions des usines de pâtes pendant des périodes prolongées affichent souvent un feuillage clairsemé (fig. 242). Les aiguilles deviennent chlorotiques (fig. 243), rabougries, et tombent prématurément (fig. 244 et 245). Dans les zones fortement polluées, des symptômes d'endommagement aigus (fig. 245) apparaissent sur les aiguilles de tous les âges, qui restent sur les arbres et qui sont plus intenses sur les plus âgées (fig. 246). Une chlorose s'étendant progressivement de l'extrémité vers la base des aiguilles (fig. 246) est le symptôme le plus fréquent de l'exposition régulière et moyennement intense aux émissions de gaz soufrés. Ces symptômes foliaires sont plus prononcés sur les aiguilles plus vieilles (fig. 247). Comme les émissions des usines de pâtes comportent des gaz soufrés ainsi que plusieurs autres polluants, il se produit parfois des bandes chlorotiques (fig. 248). Il arrive également que des gouttelettes de matières alcalines présentes dans les effluents se déposent à la surface des aiguilles, provoquant ainsi une certaine décoloration aux points de contact (fig. 249 et 250). Il n'est pas rare que les émissions de ces usines tuent les arbres, surtout dans les zones fréquemment exposées durant la saison de croissance active.

Lecture suggérée

Carlson, C.E. 1974. *Sulphur damage to Douglas-fir near a pulp and paper mill in western Montana.* United States Department of Agriculture. Forest Service, Northern Region. Division of State and Private Forestry. Missoula, Montana. Report 74–13.

Stress provoqués par les polluants — moteurs à combustion fixes et industrie des produits chimiques agricoles (ammoniac anhydre). Symptômes des effets des oxydes d'azote provenant des moteurs à combustion fixes et des vapeurs ammoniacales exhalées par les engrais à l'ammoniac anhydre sur les essences forestières (fig. 251 à 266). Tous ceux des oxydes d'azote ont été provoqués sur des plantes cultivées au laboratoire dans des conditions contrôlées.

Oxydes d'azote : Fig. 251 Premiers symptômes d'endommagement apparaissant à la base des jeunes aiguilles du pin. **Fig. 252** Symptômes avancés chez le pin se traduisant par un blanchiment général suivi d'un brunissement. **Fig. 253** Chlorose et nécrose à l'extrémité des aiguilles du pin, par suite d'une exposition intense. **Fig. 254** Gros plan des aiguilles illustrées à la figure 253. **Fig. 255** Stade initial de la chlorose chez le peuplier faux-tremble. **Fig. 256** Chlorose marginale et internervaire et blanchiment chez le peuplier. **Fig. 257** Début de nécrose marginale et internervaire chez le peuplier faux-tremble. **Fig. 258** Nécrose internervaire et marginale avancée chez le bouleau. **Fig. 259** Début de décoloration marginale et internervaire chez le saule. **Fig. 260** Symptômes de nécrose avancée chez le saule avant l'affaissement total des tissus. **Fig. 261** Chlorose internervaire grave et nécrose irrégulière chez l'aulne. **Vapeurs ammoniacales : Fig. 262** Début de chlorose chez le peuplier. **Fig. 263** Dommages foliaires aigus chez le peuplier évoluant des marges vers le centre. **Fig. 264** Taches foliaires non spécifiques chez le peuplier faux-tremble. **Fig. 265** Taches foliaires non spécifiques et aspect givré chez le saule. **Fig. 266** Décoloration chez un peuplier par suite d'une brève exposition aux vapeurs ammoniacales.

251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266

Moteurs à combustion fixes

On utilise surtout ce genre de moteurs pour comprimer le gaz naturel, faire fonctionner les pompes des gazoducs et des oléoducs et produire de l'électricité. Le gaz naturel, le pétrole, le gasoil et le charbon employés pour actionner les moteurs à haute température entraînent l'émission d'oxydes d'azote, d'hydrocarbures partiellement brûlés, de gaz soufrés et de petites quantités de monoxyde de carbone (CO).

Lorsque la température de combustion dépasse 3500° C, une partie de l'azote de l'air s'oxyde pour former du monoxyde d'azote (NO). Dans un rayon de 1,5 km de la source, jusqu'à 40 % du NO total s'oxyde à un degré plus poussé pour donner du dioxyde d'azote (NO_2) sous l'effet de réactions photochimiques où interviennent la lumière solaire et des hydrocarbures. Le NO_2, par le jeu des interactions photochimiques, produit de l'ozone (O_3) et du nitrate de peracétyle (PAN).

Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote constituent probablement les polluants les plus importants émis par les moteurs à combustion fixes. Ils peuvent produire des phytointoxications dans les régions forestières. Le NO_2, qui est assez répandu, peut causer des dommages considérables.

Chez les jeunes conifères exposés à des concentrations moyennement élevées d'oxydes d'azote, les aiguilles présentent des lésions nécrotiques ou encore des brûlures à leur extrémité. Parfois, le premier symptôme est la présence d'un anneau blanc près de la base des aiguilles (fig. 251). Si l'exposition se poursuit, le blanchiment devient général, et les tissus atteints se nécrosent graduellement (fig. 252). D'autre part, des concentration aiguës de NO_2 entraînent rapidement la nécrose des vieilles aiguilles à partir de leur extrémité ainsi qu'une chlorose générale des jeunes aiguilles (fig. 253 et 254).

Chez les feuillus, le NO_2 provoque d'abord une chlorose non spécifique, un brunissement ou un blanchiment entre les nervures, surtout près des marges (fig. 225 à 257 et 259). Ces symptômes sont suivis d'une décoloration plus intense ou d'une nécrose qui s'étend à toute la feuille sous la forme de taches irrégulières ou d'un affaissement général des tissus (fig. 258 et 260). Dans ce dernier cas les tissus atteints présentent d'abord des zones trempées qui se dessèchent ensuite et tournent au brun. Chez l'aulne, une grave chlorose internervaire précède la nécrose qui se signale par une teinte brun roux (fig. 261). Normalement, les feuilles matures sont plus sensibles aux oxydes d'azote que les plus jeunes. Des conditions humides semblent intensifier les symptômes. En réagissant avec l'eau présente à l'intérieur ou à la surface des feuilles, le NO_2 se transforme en composés toxiques, tels que les acides nitreux et nitrique, qui causent des lésions aux tissus lorsque leurs concentrations dépassent un certain seuil.

Les lésions foliares chroniques dues à une exposition continue à des concentrations relativement faibles d'oxydes d'azote se manifestent par une intensification de la teinte verte, suivie d'une chlorose et d'une chute importante des feuilles. En outre, les très faibles concentrations de monoxyde d'azote peuvent avoir des effets physiologiques qui se traduisent par un ralentissement de la croissance et une baisse de rendement sans aucun symptôme visible de phytotoxicité. Ces effets sont probablement attribuables à l'inhibition de la photosynthèse et d'autres processus vitaux.

Sur le terrain, il peut être difficile de diagnostiquer avec exactitude les symptômes d'endommagement par le monoxyde d'azote sur les feuillus. Plusieurs autres polluants, comme le SO_2, le chlorure d'hydrogène et l'ozone, de même que la carence en magnésium, produisent des symptômes chlorotiques et nécrotiques qui peuvent ressembler à ceux provoqués par le SO_2. Il est donc particulièrement important de vérifier la présence d'éventuelles sources d'émission et de recueillir des renseignements sur la qualité de l'air et les conditions météorologiques dans la région.

Ozone et pan

Un produit important des interactions du NO_2 avec les hydrocarbures partiellement brûlés est un smog photochimique renfermant de l'ozone (O_3) et du PAN. Le smog photochimique se forme généralement dans les grandes zones urbaines sous l'effet des gaz d'échappement des automobiles. Il a des répercussions sur la végétation forestière à cause du phénomène du transport des polluants à grande distance.

Chez les feuillus, l'ozone entraîne la chlorose, la nécrose et des taches à la face supérieure des feuilles. La teinte des tissus nécrotiques peut varier du presque blanc au rouge orange, selon l'espèce. L'ozone peut détruire les petites nervures mais laisse les grosses intactes. Chez la plupart des plantes à feuilles décidues, un dommage fréquent est le blanchiment de la face supérieure des feuilles.

Chez les conifères, l'ozone provoque l'apparition de taches jaunes et vertes sur les faces des aiguilles. Chez les espèces sensibles, l'aiguille entière se nécrose et tombe prématurément. Cette nécrose commence à l'extrémité et les taches apparaissent au bas de la partie nécrosée.

En général, le PAN donne un aspect givré, bronzé ou argenté à la face inférieure des feuilles décidues et peut également causer des dommages à la face supérieure chez certaines espèces. La chlorose commence peu de temps après l'exposition à de fortes concentrations de PAN, et la partie endommagée devient progressivement flasque. Après le flétrissement, un aspect givré et bronzé peut apparaître à la limite de la bande de tissus effondrés. En cas d'endommagement grave souvent l'aspect givré et bronzé n'apparaît pas. Les symptômes provoqués par le PAN chez les conifères ne sont pas bien décrits dans les publications.

Lectures suggérées

Hill, A.C., H.E. Heggestad & S.N. Linzon. 1970. Ozone. Pages B1-B22 *in Recognition of air pollution injury to vegetation : A pictorial atlas.* Jacobson, J.S. & A.C. Hill (eds.). Air Pollution Control Association Pittsburg, Pennsylvania. Information Report 1.

Taylor, O.C. & D.C. MacLean. 1970. Nitrogen oxides and peroxyacyl nitrates. Pages E1-E14 *in Recognition of air pollution injury to vegetation : A pictorial atlas.* Jacobson, J.S. & A.C. Hill (eds.). Air Pollution Control Association. Pittsburg, Pennsylvania. Informative Report 1.

Industrie des produits chimiques agricoles

Vapeurs ammoniacales

L'ammoniac anhydre, dont l'emploi comme engrais est maintenant répandu, constitue la principale source de pollution par l'ammoniac gazeux. Si un déversement accidentel se produit au cours du transport, les émanations qui s'endégagent peuvent causer des dommages graves à la végétation. Les fuites des réservoirs de stockage sont également à l'origine de dommages à la végétation. De tels dommages ont déjà été observés à 3 km sous le vent d'un lieu de déversement.

Les effets de l'ammoniac ne sont pas toujours spécifiques et peuvent ne pas se limiter aux parties internervaires comme dans le cas du SO_2. Chez les feuillus, les faibles concentrations n'entraînent pas nécessairement la chlorose du feuillage. Sous l'effet de fortes concentrations, cependant, la surface entière de la feuille devient chlorotique, ce qui donne parfois aux feuillage un aspect « cuit » (fig. 262). Les symptômes de chlorose sont souvent suivis de l'apparition d'une teinte bronzée qui commence le long des marges et s'étend progressivement vers le centre (fig. 263). Dans bien des cas, l'ammoniac provoque l'apparition de taches nécrotiques dispersées et donne un aspect givré à la face supérieure des feuilles (fig. 264 et 265). Un feuillage modérément affecté par des vapeurs ammoniacales pendant une courte période de temps (fig. 266) peut se rétablir rapidement.

Comme l'ammoniac est surtout employé sur les terrains agricoles de la prairie arborée, où le peuplier faux-tremble et le peuplier dominent, il existe peu de documentation quant à ses effets sur les conifères. En général, les vieilles aiguilles noircissent, et les jeunes prennent une teinte jaune roux.

Lectures suggérées

Heck, W.W., R.H. Daines & T.J. Hindawi. 1970. Other phytotoxic pollutants. Pages F1-F24 *in Recognition of air pollution injury to vegetation : A pictorial atlas.* Jacobson, J.S. & A.C. Hill (ads.). Air Pollution Control Association. Pittsburg, Pennsylvania. Informative Report 1.

Temple, P.J., D.S. Harper, R.G. Pearson & S.N. Linzon 1979. Toxic effects of ammonia on vegetation in Ontario. *Environmental Pollution* 20: 297-302.

Treshow, M. 1970. *Environment and plant response.* McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario. Pages 362-363 (ammonia).

Herbicides, stérilisants du sol et pesticides

À cause de leur ample utilisation en agriculture, ces produits représentent une menace sérieuse pour l'environnement. Le 2,4-D, un des premiers produits chimiques à être employés en agriculture, et ses dérivés sont probablement les plus répandus. Ils comptent parmi les plus phytotoxiques et, dans certaines conditions, sont les plus sélectifs des herbicides. Des dommages graves peuvent être observés sur la végétation jusqu'à plusieurs kilomètres du lieu d'épandage par suite du charriage effectué par le vent et parfois de la volatilité de certains composés.

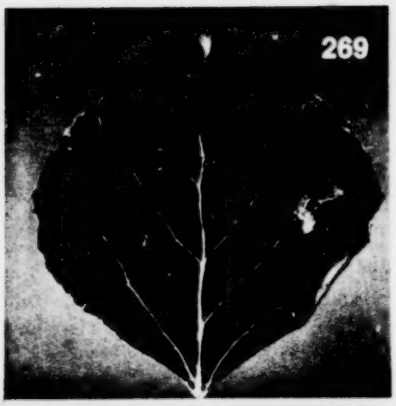
Plusieurs herbicides, stérilisants du sol et pesticides peuvent avoir des effets nocifs sur la végétation. Les examiner tous serait hors du propos de ce guide.

Stress provoqués par les polluants — Industrie des produits chimiques agricoles (herbicides). Symptômes des effets du 2,4,5-T et du 2,4-D sur les essences forestières (fig. 267 à 278).

2,4,5-T : Fig. 267 Feuille de peuplier présentant une nécrose marginale. **Fig. 268** Taches nécrotiques chez le saule. **Fig. 269** Nécrose des tissus chez le peuplier faux-tremble. **2,4,5-D : Fig. 270** Feuillage de peuplier décoloré, recourbé et enroulé. **Fig. 271** Décoloration, recourbement et enroulement chez le saule. **Fig. 272** Enroulement, recourbement et nécrose grave des feuilles d'un bouleau. **Fig. 273** Décoloration des nouvelles pousses d'une épinette blanche une semaine après un épandage de 2,4-D. **Fig. 274** Gros plan d'aiguilles décolorées de l'épinette blanche de la figure 273. **Fig. 275** Décoloration et brunissement subséquent d'aiguilles d'une épinette blanche. **Fig. 276** Nécrose avancée presque totale sur une épinette blanche. **Fig. 277** Symptômes nécrotiques commençant à la base des aiguilles chez un pin (jeunes tissus). **Fig. 278** Gros plan des aiguilles de la figure précédente (277) montrant la torsion et la nécrose des tissus.

267

268


269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

Herbicides

Nombreux et variés sont les herbicides employés à proximité des forêts. Seuls le 2,4-D et le 2,4,5-T, les plus couramment employés, seront examinés. Ces composés sont largement répandus et assez toxiques. À des concentrations très faibles, ils sont nocifs pour une grande variété de plantes. En général, le 2,4-D est surtout efficace contre les plantes à grandes feuilles. Par contre, les plantes fourragères, les céréales et d'autres monocotylédones lui sont relativement résistantes. Le 2,4,5-T est efficace contre presque tous les types de plantes et est notamment utilisé pour le débroussaillement des terrains servant au transport de l'énergie.

Les feuilles de peuplier, de saule et de peuplier faux-tremble sont extrêmement sensibles au 2,4,5-T qui entraîne leur nécrose même à des concentrations faibles ou modérées (0,25 à 1 kg/ha)[fig. 267 à 269]. Une nécrose grave est souvent suivie de la chute des feuilles et de la mort de ces arbres.

À faibles concentrations, le 2,4-D agit à l'instar d'une hormone de croissance, en stimulant la division cellulaire et l'élongation. Toutefois, comme cette croissance excessive se fait aux dépens des métabolites qui sont également requis pour d'autres processus cellulaires, elle entraîne l'affaissement des tissus. L'épinastie (forme recourbée) des pousses terminales, la torsion, le recourbement des tissus et le blanchiment des feuilles (fig. 270 et 271) sont des symptômes typiques des effets du 2,4-D sur la croissance. Ces symptômes apparaissent en général quelques heures seulement après l'épandage et peuvent être suivis d'une décoloration et d'une nécrose grave des feuilles (fig. 272).

Chez les conifères, les jeunes aiguilles sont plus sensibles au 2,4-D que les vieilles (fig. 273 et 274). La quantité requise pour endommager ou tuer l'arbre est beaucoup plus élevée que chez les feuillus. Dans le cas de l'épinette, après le blanchiment initial, les aiguilles commencent à brunir (fig. 275), puis tous les tissus foliaires, peu importe leur âge, prennent une teinte brun roux ou se nécrosent, et finalement l'arbre meurt (fig. 276). Sous l'action du 2,4-D, les aiguilles du pin se tordent et se nécrosent (fig. 277 et 278).

Lectures suggérées

Heck, W.W., R.H. Daines & I.J. Hindawi. 1970. Other phytotoxic pollutants (herbicides). Pages F3-F4 in *Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas.* Jacobson, J.S. & A.C. Hills (eds.) Air Pollution Control Association, Pittsburg, Pennsylvania. Informative Report 1.

Hindawi, I.J. 1970. *Air pollution injury to vegetation.* United States Department of Health, Education, and Welfare. National Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71. Pages 36-39.

Treshow, M. 1970. *Environment and plant response.* McGraw-Hill Book Co. Toronto, Ontario. Page 378 (herbicides).

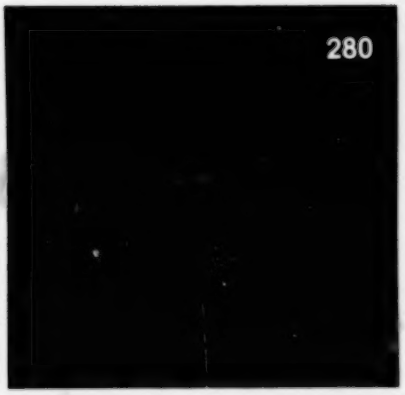
Turner, D.J. 1977. *The safety of the herbicides 2,4-D and 2,4,5-T.* Forestry Commission. Her Majesty's Stationery Office. London, England. Bulletin 57.

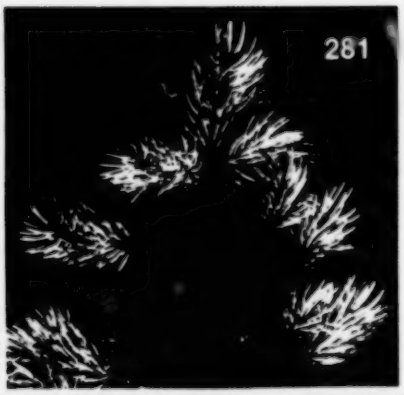
Yarish, W. 1980. *Recognizing herbicide action and injury.* Alberta Agriculture, Edmonton, Alberta. Agdex 641-7.

Stress provoqués par les polluants — Industrie des produits chimiques agricoles (Stérilisants du sol et pesticides). Symptômes des effets de quatre stérilisants du sols, le piclorame, le bromacil, le chlorate de sodium et l'amitrole ainsi que d'un pesticide, le diméthoate, sur la végétation forestière (fig. 279-290).

Piclorame : Fig. 279 Symptômes chez le pin. **Fig. 280** Décoloration d'une feuille de peuplier. **Bromacil : Fig. 281** Jaunissement prononcé des pousses de l'année et brûlure de l'extrémité des aiguilles plus âgées d'une épinette blanche. **Fig. 282** Gros plan des dommages illustrés à la figure 281 sur les aiguilles de l'année d'une épinette blanche. **Fig. 283** Chlorose partielle du feuillage de l'année d'un pin, commençant à l'extrémité des aiguilles, et brunissement du feuillage plus âgé. **Chlorate de sodium : Fig. 284** Décoloration du feuillage de l'année d'une épinette blanche deux jours après un épandage de chlorate de sodium. **Fig. 285** Décoloration du jeune feuillage chez le pin. **Fig. 286** Décoloration marginale d'une feuille de peuplier faux-tremble. **Fig. 287** Dessiccation et nécrose d'une feuille de bouleau. **Amitrole : Fig. 288** Nécrose chez un peuplier faux-tremble. **Diméthoate : Fig. 289** Chlorose internervaire et marginale des feuilles du cerisier de Virginie. **Fig. 290** Décoloration et nécrose chez le bouleau.

279

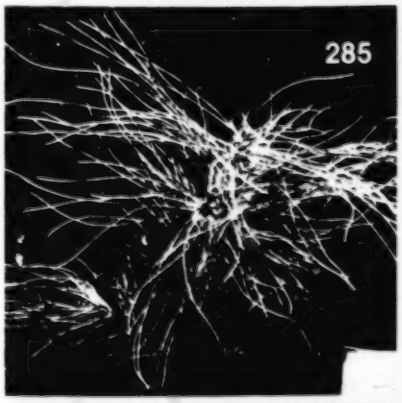

280

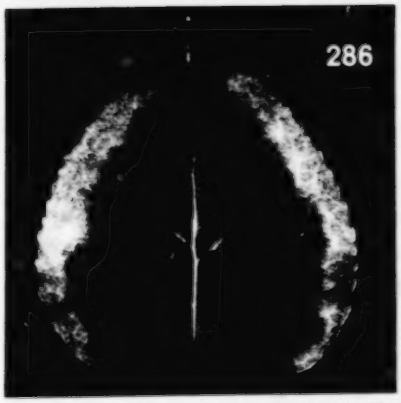

281

282

283

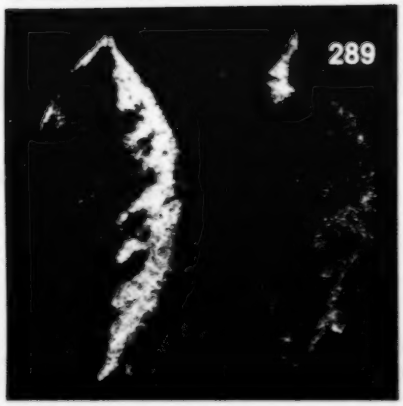
284

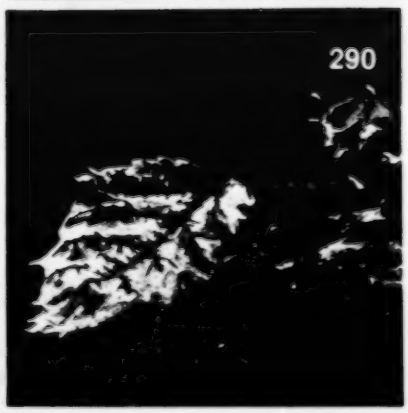

285


286

287

288


289


290

Stérilisants du sol

Certains stérilisants sont sujets à une évaporation partielle après leur épandage dans le sol. Ainsi, des vapeurs de piclorame provenant de sols traités peuvent être toxiques pour la fragile végétation environnante. La vitesse de déplacement de l'air et la température au-dessus du sol traité déterminent l'importance de l'évaporation.

L'épandage de piclorame entraîne chez les conifères un brunissement des aiguilles de l'année, qui est suivi d'une nécrose générale du feuillage entier puis de la mort de l'arbre (fig. 279). Le piclorame est particulièrement efficace contre les plantes à grandes feuilles, même à de très faibles doses (fig. 280).

Le bromacil, ou Hyvar, est un autre stérilisant du sol très efficace. Employé normalement pour éliminer les mauvaises herbes et les broussailles dans les zones non cultivées, il peut causer des dommages dans les forêts s'il y est charrié par le vent. Chez l'épinette, il peut causer une chlorose grave des jeunes aiguilles de l'année et un brunissement à l'extrémité des plus vieilles (fig. 281). Le jaunissement semble commencer à l'extrémité de l'aiguille et s'étendre vers la base (fig. 282). Des petites marques jaunes sont visibles sur la partie encore verte des aiguilles (fig. 282), à la différence des dommages causés par le SO_2 où il y a une limite très nette entre la zone chlorotique ou nécrotique et la partie encore verte. Les effets du bromacil sont similaires sur le pin et sur l'épinette (fig. 283).

Le chlorate de sodium est également employé comme stérilisant du sol, spécialement pour tuer les plantes pérennes à racines profondes. Il exerce à la fois une action défoliatrice et desséchante, ou bien déshydratante. Employé à fortes concentrations comme desséchant, il arrête la croissance et le développement de la plante en quelques heures. Chez les conifères, les épandages de chlorate de sodium provoquent la décoloration des jeunes aiguilles (fig. 284 et 285).

Chez les feuillus, comme le peuplier faux-tremble, un épandage de chlorate de sodium dans le sol provoque la décoloration de la bordure et des marques blanches irrégulières sur le reste de la feuille (fig. 286). À fortes concentrations, il provoque la dessiccation, la nécrose (fig. 287) et la chute prématurée des feuilles.

L'amitrole est un stérilisant souvent employé à cause de sa grande phytotoxicité et de sa persistance. Il agit en détruisant les pigments foliaires, en réduisant la teneur en humidité et en provoquant la défoliation, surtout à faibles concentrations. La chlorose et la nécrose des feuilles (fig. 288) sont les résultats directs de son action sur les pigments chlorophylliens. Les dommages commencent à l'extrémité et à la bordure de la feuille pour s'étendre progressivement à la surface entière.

Pesticides

Une vaste gamme d'insecticides et de fongicides sont également très employés. Les composés considérés comme potentiellement toxiques font l'objet de restrictions, et leurs conditions et limites d'emploi sont indiquées sur l'étiquette. Un certain nombre de pesticides peuvent causer des dommages lorsqu'ils sont utilisés sur des plantes autres que celles pour lesquelles ils sont prévus. Bon nombre sont dommageables pour la végétation forestière et produisent des symptômes qui peuvent ressembler à ceux de certains polluants atmosphériques.

En général, les insecticides peuvent être plus phytotoxiques que les fongicides. Le diméthoate est un insecticide couramment employé sur les arbres d'ombrage et ceux des rideaux protecteurs ainsi que sur les cultures agricoles. Aux doses dépassant la limite recommandée, il peut provoquer chez les espèces à grandes feuilles des symptômes d'intoxication ressemblant à ceux du SO_2. Sur les feuilles du cerisier de Virginie, il provoque une nette chlorose internervaire et marginale (fig. 289). Contrairement à l'intoxication par le SO_2, dans le cas du diméthoate, les feuilles de tous les âges sont touchées, les jeunes étant cependant plus sensibles. Le diméthoate est également un agent connu de décoloration internervaire et de brunissement des feuilles du bouleau (fig. 290).

Lectures suggérées

Hindawi, I.J. 1970. *Air pollution to vegetation*. United States Department of Health, Education, and Welfare. Air Pollution Control Administration. Raleigh, North Carolina. Publication AP-71. Pages 36-39.

Rich, S. 1975. Interactions of air pollution and agricultural practices. Pages 335-360 *in Responses of plants to air pollution*. Mudd, J.B. & T.T. Kozlowski (eds.). Academic Press, Inc. New York.

Tableau synoptique des principaux effluents industriels et des symptômes visibles de leurs effets sur la végétation forestière

Dans le tableau qui suit, les symptômes visuels caractérisant les dommages causés aux conifères et aux feuillus par les diverses émissions industrielles examinées dans le guide sont décrits brièvement. Comme indiqué dans la colonne des remarques, les dommages visibles causés par un polluant peuvent dans certains cas ressembler à s'y méprendre aux symptômes que provoque un autre polluant ou à ceux d'un autre type de stress. Pour établir le diagnostic, nous recommandons donc de consulter la partie du guide consacrée à l'industrie en cause pour s'assurer de bien déterminer l'origine des dommages observés.

Tableau synoptique des principaux effluents industriels et des symptômes visibles de leurs effets sur la végétation forestière

Industrie	Principaux effluents	Symptômes visibles sur les conifères	Symptômes visibles sur les feuillus	Remarques
Gaz naturel et pétrole	SO_2	Jaunissement des vieilles aiguilles, suivi du brunissement et de la mort des tissus. La décoloration commence à l'extrémité des aiguilles et s'étend progressivement vers la base (fig. 87). Les zones décolorée et verte sont, en général, nettement délimitées.	Aspect mouillé de la face inférieure des feuilles, puis décoloration internervaire et marginale (fig. 102). Une dessiccation rapide des feuilles peut entraîner leur enroulement et leur flétrissement.	Des pesticides comme le diméthoate peuvent provoquer sur les feuillus des symptômes similaires à ceux du SO_2, mais avec cette différence que les jeunes feuilles sont plus sensibles au diméthoate que les vieilles. Les symptômes des effets du SO_2 chez les feuillus ressemblent parfois à ceux du NO_2 et des vapeurs ammoniacales.
	Hydrocarbures liquides	Les fractions légères donnent un aspect huileux au feuillage alors que les fractions lourdes y laissent une couche goudronneuse. Dans le cas des fractions légères, les symptômes chlorotiques apparaissent d'abord sur les jeunes aiguilles aux points de contact. Lorsque les hydrocarbures sont étalés uniformément, les dommages commencent à l'extrémité des aiguilles puis s'étendent progressivement la vers la base (fig. 121).	Dommages localisés à la surface de la feuille aux points de contact. Les fractions légères provoquent le recourbement et la torsion des tissus foliaires (fig. 130 et 135), qui sont suivis de la défoliation.	Des herbicides comme le 2,4-D et le piclorame peuvent également causer la torsion et l'enroulement des feuilles chez les feuillus. Toutefois, tous les tissus, y compris ceux des remeaux et des branches, sont alors atteints.
	Déversements d'eau salée	Au début, teinte rose pâle à magenta intense ou brun roux des nouvelles aiguilles et de celles âgées d'un an (fig. 146). Les symptômes apparaissent d'abord à l'extrémité des aiguilles, puis s'étendent progressivement jusqu'à la base. Contrairement à ce qui a lieu en cas de sénescence automnale naturelle, le feuillage tué par le sel reste attaché aux branches beaucoup plus longtemps.	Chlorose et nécrose de l'extrémité et des marges de la feuille, s'étendant rapidement vers le centre pour recouvrir la surface entière (fig. 154 et 155), puis enroulement de la feuille (fig. 156).	Le parcours de l'eau salée dans la forêt peut souvent être retracé en suivant les lésions du feuillage des plantes de la couverture vivante.

Tableau synoptique des principaux effluents industriels et des symptômes visibles de leurs effets sur la végétation forestière

Industrie	Principaux effluents	Symptômes visibles sur les conifères	Symptômes visibles sur les feuillus	Remarques
Mines et fonderies de métaux	SO_2, métaux lourds et particules	Chlorose et nécrose des vieilles aiguilles d'abord, progressant de l'extrémité vers la base (fig. 179). La présence de métaux lourds dans les effluents émis par les fonderies provoque souvent l'apparition de bandes irrégulières de décoloration à la surface des aiguilles (fig. 198).	Aspect humide des feuilles entre les nervures et aux marges, puis chlorose (fig. 208), nécrose (fig. 210) et défoliation prématurée (fig. 206). La morphologie des lésions est souvent irrégulière (fig. 212), surtout à proximité de la source d'émission.	
	Fluorures	Chez le pin, brûlure spectaculaire progressant rapidement de l'extrémité vers la base. Les aiguilles de l'année sont les premières atteintes, les plus vieilles étant assez résistantes.	Aspect trempé et teinte vert pâle, puis nécrose de l'extrémité et des marges s'étendant finalement à la feuille entière. Des taches ou des bandes nécrotiques peuvent apparaître aux points d'accumulation des fluorures.	
Autres exploitations minières Ciment	Poussières renfermant surtout des oxydes de calcium, de potassium et de sodium	Rabougrissement et chute prématurée des aiguilles. Résidus souvent visibles à leur surface.	Mêmes que chez les conifères.	
Potasse	Chlorures de potassium et de sodium	_____*	Ressemblent à ceux produits par les déversements d'eau salée.	
Tas de matières calcaires		Dépôt d'une couche de gypse ou de matières semblables sur les aiguilles ou sur la tige.	Dépôt d'une couche de gypse ou de matières semblables sur les feuilles ou sur la tige.	

*Données insuffisantes.

Tableau synoptique des principaux effluents industriels et des symptômes visibles de leurs effets sur la végétation forestière

Industrie	Principaux effluents	Symptômes visibles sur les conifères	Symptômes visibles sur les feuillus	Remarques
Pâtes et papiers	H_2S, méthylmercaptan, sulfure de diméthyle, hydroxyde de sodium et ammoniac	À proximité de la source, aiguilles rabougries et bandes de tissus chlorotiques et nécrotiques aux points de contact des gouttelettes émises dans l'atmosphère (fig. 248). Aux endroits plus éloignés, les polluants gazeux produisent des symptômes chlorotiques évoluant de l'extrémité des aiguilles vers la base (fig. 246). Des taches de résidus de ces gouttelettes sont souvent évidentes à la surface des feuilles près de la source.	_____	
Moteurs à combustion fixes	Oxydes d'azote	Lésions à la surface des aiguilles (fig. 252) et brûlures fréquentes à la pointe (fig. 253 et 254). Les vieilles aiguilles sont les premières à être atteintes.	Intensification de la couleur verte, puis aspect trempé et formation de taches blanches, jaunes ou vertes de forme irrégulière sur les feuilles. (fig. 256 et 257). Les feuilles matures sont plus sensibles que les plus jeunes.	Chez les feuillus, il y a possibilité de confusion avec les symptômes provoqués par le SO_2, l'HCl, l'O_3 et la carence en magnésium.
	Ozone	Plages tachetées jaunes et vertes à la surface des aiguilles. Parfois, nécrose commençant à l'extrémité, les taches se trouvant dans la partie sous-jacente.	Chlorose, nécrose et tachetures sur la face supérieure des feuilles. La teinte des tissus nécrotiques peut varier du blanc au rouge orange selon l'espèce.	
	PAN	_____	Flétrissement des feuilles dont la face inférieure peut ensuite prendre un aspect givré, bronzé ou argenté. Chez certaines espèces, la face supérieure peut également être atteinte.	

Tableau synoptique des principaux effluents industriels et des symptômes visibles de leurs effets sur la végétation forestière

Industrie	Principaux effluents	Symptômes visibles sur les conifères	Symptômes visibles sur les feuillus	Remarques
Produits chimiques pour l'agriculture Engrais à l'ammoniac anhydre	Vapeurs ammoniacales	Souvent les vieilles aiguilles noircissent. Les plus jeunes prennent une teinte jaune rougeâtre.	Chlorose sur toute la feuille aspect cuit du feuillage (fig. 262). Ensuite, la feuille prend progressivement un aspect bronzé en commençant par les marges (fig. 263). La face supérieure présente souvent un aspect givré et des taches nécrotiques (fig. 264 et 265).	Les dommages causés par l'ammoniac chez les feuillus ne sont pas toujours spécifiques et peuvent ne pas se limiter aux parties internervaires, comme dans le cas des dommages causés par le SO_2.
Herbicides	2,4-D	Décoloration puis brunissement des aiguilles commençant par les plus jeunes (fig. 273 et 274). Les aiguilles deviennent tordues (fig. 278).	Recourbement vers le bas, torsion, enroulement et décoloration des pousses terminales (fig. 270 et 271).	Chez les feuillus, les hydrocarbures liquides peuvent également entraîner la torsion et l'enroulement des feuilles. Toutefois, ils n'attaquent pas les rameaux et les branches.
	2,4,5-T	_____	Coloration brun roux du feuillage, même à faibles concentrations (fig. 267).	
Stérilisants du sol	Piclorame	Brunissement commençant par les aiguilles de l'année. Nécrose générale (fig. 279) par la suite.	Nécrose générale de la feuille entière, même à faibles concentrations (fig. 280).	
Stérilisants du sol (suite)	Bromacil	Chlorose sévère des jeunes aiguilles de l'année, puis brûlure de l'extrémité des aiguilles plus vieilles (fig. 281). Jaunissement commençant à l'extrémité et s'étendant progressivement vers la base des aiguilles. Présence fréquente de petites marques jaunes dans la partie encore verte des aiguilles chlorotiques.	_____	
	Chlorate de sodium	D'abord, décoloration des jeunes aiguilles (fig. 285). Plus tard, nécrose.	Décoloration marginale et marques blanches irrégulières sur le reste de la feuille (fig. 286), puis nécrose et chute prématurée du feuillage.	

Tableau synoptique des principaux effluents industriels et des symptômes visibles de leurs effets sur la végétation forestière

Industrie	Principaux effluents	Symptômes visibles sur les conifères	Symptômes visibles sur les feuillus	Remarques
	Amitrole	_____	Chlorose et nécrose commençant à l'extrémité et aux marges de la feuille. Les symptômes s'étendent progressivement à la surface entière de la feuille.	
Pesticides	Diméthoate	_____	Décoloration internervaire et marginale (fig. 289 et 290).	Chez les feuillus, le SO_2 peut provoquer des symptômes analogues à ceux causés par le diméthoate, mais les symptômes n'apparaissent pas sur les feuilles de tous les âges, les jeunes étant plus sensibles que les vieilles.

Remerciements

Les auteurs tiennent à dire combien leur ont été utiles les critiques savantes de D.C. McCune, du Boyce Thompson Institute for Plant Research de l'université Cornell, et de S.N. Linzon, du *Ministry of the Environment* de l'Ontario, ainsi que les nombreux commentaires qu'ils ont reçus des personnes suivantes: H.F. Cerezke, J.M. Powell, G.D. Hogan, Y. Hiratsuka, I.K. Edwards et A.A. Khan, du Centre de recherches forestières du Nord; P.J. Rennie et L.W. Carlson, du Service canadien des forêts à Ottawa; J. Lack et A. Schulz, de l'Alberta Environment; W.N. Barnes, de l'Alberta Forest Service; et D. Shaw, de l'Alberta Energy Resources Conservation Board.

Nous tenons à souligner la collaboration des personnes suivantes du Centre de recherches forestières du Nord: P. Debnam qui a pris grand soin des photographies, P.A. Logan qui a effectué une excellente révision des textes et R.M. Waldron et J.K. Samoil qui ont supervisé la production du présent guide à partir du manuscrit dactylographié.

Par leurs constants encouragements et conseils, R.W. Reid et G.T. Silver, également du Centre de recherches forestières du Nord, nous ont aidés à mener le travail à bonne fin.

Glossaire

Assise de séparation: Groupe spécial de cellules à la base du pétiole ou de la queue, dont la formation précède la chute de la feuille ou du fruit.

Aigu (symptôme): Nécrose soudaine et étendue des tissus foliaires provoquée par l'exposition à de fortes concentrations de polluants atmosphériques en une courte période de temps.

Aérosol: Suspension de particules ultramicroscopiques, liquides ou solides, dans un milieu gazeux (air par exemple).

Acides aminés: Composés organiques, constituants de base de toutes les protéines.

Analogues: Composés très voisins.

Antagoniste (effet): Se dit lorsque l'interaction de deux facteurs a comme résultat un effet total inférieur à la somme des effets individuels de chacun.

Assimilation: Processus par lequel les substances essentielles sont utilisées pour les fonctions normales des tissus.

Bioindicateurs: Espèce biologique utilisée comme indicatrice de l'action d'une pollution de l'air.

Brûlure: Maladie ou lésion d'une plante causée par des champignons, des bactéries, des virus, des insectes ou des conditions climatiques défavorables; n'entraîne pas la carie.

Bryophytes: Plantes sans fleurs, telles que les mousses et les hépatiques.

Calcaire: Renfermant du carbonate de calcium ou d'autres sels de calcium.

Calciphile: Se dit d'une plante qui pousse surtout sur des sols alcalins riches en calcium.

Cambium: Chez les plantes supérieures, couche de cellules qui se divisent pour former le xylème vers l'intérieur et le phloème vers l'extérieur de la tige.

Cellulaire (métobolisme): Ensemble des processus de synthèse et de dégradation des composés organiques chez les organismes vivants.

Chélation: Liaison d'un ion métallique avec au moins un groupement d'un autre composé.

Chlorophylle: Pigment vert des plantes, normalement présent dans les tissus foliaires.

Chlorose: Perte ou réduction du pigment vert (chlorophylle) des plantes, qui entraîne généralement leur jaunissement.

Chronique (symptôme): Chlorose pouvant entraîner une nécrose, suite à l'exposition de la végétation à diverses concentrations de polluants atmosphériques pendant une longue période de temps.

Cladina: Lichens du sol, extrêmement ramifiés, ne possédant pas d'apothécies en forme de coupes.

Cladonia: Lichens du sol pas très ramifiés ayant la forme d'une coupe.

Corticoles (lichens): Qui poussent sur le tronc ou les branches des arbres.

Crustacés (lichens): Lichens crustiformes poussant en relation étroite avec le substrat.

Cumulatif (effet): Se dit lorsque le résultat de l'action combinée de plusieurs facteurs équivaut à la somme de leurs effets individuels.

Cuticule: Couche non cellulaire externe de sécrétions cireuses produites par les cellules épidermiques et d'autres cellules internes; sa principale fonction est d'empêcher la déshydratation excessive.

Dessiccation: Processus de déshydratation ou de perte de l'eau des tissus.

Écosystème: Système fonctionnel qui englobe l'ensemble des organismes vivants, des facteurs inertes (ensoleillement, température, humidité, sol, éléments minéraux, topographie, etc.) et de leurs interactions.

Épiderme: Couche la plus externe de cellules végétales, située sous la cuticule; normalement monocellulaire, elle sert à protéger les tissus sous-jacents.

Épinastie: Recourbement d'une partie d'une plante vers l'extérieur et vers le bas en raison d'une croissance plus rapide d'un côté.

Épiphyte: Plante qui croît sur d'autres plantes lui servant de support, sans les parasiter.

Flasque: Qui manque de fermeté et de vigeur.

Foliacés (lichens): Lichens en forme de feuilles.

Fructification: Structure spécialisée produisant des spores.

Fructiculeux (lichens): Lichens ramifiés au port arbustif ou dressé.

Fumigation: Exposition de la végétation à des gaz, des vapeurs ou des fumées, au laboratoire ou sur le terrain.

Herbicide: Composé chimique employé pour détruire une plante ou en inhiber la croissance.

Hydrocarbures: Classe de composés organiques contenant de l'hydrogène et du carbone, y compris ceux qu'on trouve dans le pétrole, les sables bitumineux, le gaz naturel et le charbon.

Hyphes: Filaments multicellulaires de taille microscopique qui constituent le thalle d'un champignon.

Hypogymnia: Lichens d'aspect foliacé, à lobes creux, ordinairement de couleur grise ou brun grisâtre, poussant sur les arbres.

Internervaire: Situé entre les nervures des feuilles.

Larve: Forme immature des insectes qui passent par plusieurs stades avant d'atteindre le stade adulte.

Lichen: Végétal inférieur complexe formé de l'association d'un champignon et d'une algue.

Marginal: Se dit d'un symptôme chlorotique ou nécrotique qui se développe sur les marges des feuilles.

Mésophylle: Couche de cellules entre l'épiderme supérieur et l'épiderme inférieur des feuilles, qui assurent la photosynthèse, la respiration et la division cellulaire.

Masse moléculaire: Somme des masses atomiques de tous les éléments d'une formule chimique.

Monocotylédones: Classe de végétaux qui se distinguent par la présence d'un embryon ne produisant qu'une seule feuille.

Moucheté: Qui présente des taches d'autres couleurs sur le vert normal du feuillage.

Mycélium: Masse d'hyphes entrelacés qui produisent des spores chez les champignons.

Nanisme: État d'une plante qui n'a pas atteint le développement et les dimensions ordinaires des individus de l'espèce.

Nécrose: Mort de tissus vivants, caractérisée par leur brunissement et leur dessiccation.

Non biodégradable: Qui ne peut être détruit ou réduit à une forme beaucoup plus simple par des moyens biologiques.

Nucléus: Structure intra cellulaire renfermant le matériel héréditaire et permettant la formation de nouvelles cellules.

Parmelia: Lichen foliacé au thalle aplati, qui vit sur l'écorce des arbres, les surfaces rocheuses, etc.

Particulaires (matières): Particules fines, séparées.

Peltigera: Lichen foliacé succulent, de grande taille, de couleur verdâtre, qui pousse normalement sur le sol ou sur des mousses.

pH: Logarithme négatif de la concentration de l'ion hydrogène dans une solution; est employé comme indicateur du niveau d'acidité ou d'alcalinité.

Phloème: Tissu conducteur complexe, principalement responsable du transport des substances nutritives des feuilles aux bourgeons et aux racines.

Photosynthèse: Processus par lequel les plantes vertes utilisent l'énergie de la lumière solaire absorbée par la chlorophylle pour transformer le dioxyde de carbone et l'eau en composés organiques.

Phytointoxication: Affection des plantes sous l'effet de composés toxiques ou d'autres facteurs nocifs.

Prédisposition: Condition ou ensemble de conditions qui accroissent la vulnérabilité à d'autres facteurs de stress.

Pustule de rouille: Petit soulèvement renfermant les frucifications d'un champignon parasite (rouille).

Résinose: Sécrétion excessive de résine par les tissus des conifères, ordinairement par suite d'une lésion.

Respiration: Phénomène libérateur d'énergie par lequel les aliments à haute teneur en énergie sont dégradés en produits beaucoup plus simples.

Rosette: Groupe circulaire de feuilles.

Rouge physiologique: Détérioration du feuillage qui se traduit par une coloration brun roux chez les conifères sous l'effet de conditions climatiques défavorables. Elle se rencontre surtout dans les parties moyennes et supérieures des avant-monts et dans la partie est des principaux cols des Rocheuses.

Saxicoles (lichens): Poussant sur les rochers.

Siliceux: Qui a rapport à la silice ou aux silicates.

Stomates: Petites ouvertures dans l'épiderme des feuilles qui facilitent les échanges gazeux et la transpiration.

Symptôme: Caractéristique visible d'un état morbide.

Synergique (effet): Se dit lorsque le résultat de l'action combinée de plusieurs facteurs est supérieur à la somme des effets individuels de chacun.

Systémique: Se dit d'un composé qui est absorbé par la plante et se répand dans toute celle-ci.

Tacheture hivernale: Formation de petites lésions irrégulières à la surface des feuilles, sous l'effet de dommages causés par l'hiver.

Thalle lichénique: Appareil végétatif d'un lichen crustacé, foliacé ou fruticuleux.

Transitoire (symptôme): Légère chlorose foliaire qui se forme après une exposition à des polluants atmosphériques et qui peut disparaître complètement en quelques jours dans une atmosphère non polluée.

Transpiration: Évacuation de vapeur d'eau des feuilles, principalement par les stomates et autres parties aériennes de la plante.

Ultrastructure: Structure du protoplasme végétal décelable au microscope électronique.

Variégation: Présence irrégulière de couleurs différentes dans les tissus foliaires, attribuable à la suppression du développement de pigments normaux.

Xylème: Tissu complexe des plantes supérieures, principalement responsable du transport de l'eau et des éléments nutritifs vers le haut.

Annexes

1. Noms communs et noms scientifiques des plantes.
2. Noms communs et noms scientifiques des maladies.
3. Noms communs et noms scientifiques des insectes.
4. Noms chimiques et abréviations.

Annexe 1

Noms communs et noms scientifiques des plantes*

Aralie à tige nue	*Aralia nudicaulis* L.
Aulne	*Alnus crispa* (Ait.) Pursh
Aulne vert d'Amérique	*Alnus crispa* (Ait.) Pursh
Bouleau à papier	*Betula papyrifera* Marsh.
Bryoria	*Bryoria* sp.
Caragana	*Caragana arborescens* Lam.
Cerisier de Virginie	*Prunus virginiana* L.
Épinette blanche	*Picea glauca* (Moench) Voss
Épinette du Colorado	*Picea pungens* Engelm.
Épinette noire	*Picea mariana* (Mill.)B.S.P.
Érable négondo	*Acer negundo* L.
Hypne	*Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G.
	Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt.
Hypogymnia	*Hypogymnia physodes* (L.) W. Wats.
Lédon du Groenland	*Ledum groenlandicum* Oeder
Lichens arboricoles	*Bryoria* sp.
	Evernia mesomorpha Nyl.
	Hypogymnia physodes (L.) W. Wats.
	Parmelia sulcata Tayl.
	Usnea sp.
Lichens de la couverture vivante**	*Peltigera aphthosa* (L.) Willd.
	La plupart des *Cladonia*
Lichens des caribous**	*Cladina alpestris* (L.) Harm
	C. mitis (Sandst.) Hale & W. Culb.
	C. rangiferina (L.) Harm.
	Quelques *Cladonia*
Mélèze laricin	*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch
Orme d'Amérique	*Ulmus americana* L.
Parmelia	*Parmelia sulcata* Tayl.
Peltigera	*Peltigera aphthosa* (L.) Willd.
Peuplier baumier	*Populus balsamifera* L.
Peuplier faux-tremble	*Populus tremuloides* Michx.
Pin gris	*Pinus banksiana* Lamb.
Pin sylvestre	*Pinus sylvestris* L.
Pin tordu latifolié	*Pinus contorta* Loudon var. *latifolia* Engelm.
Sapin baumier	*Abies balsamea* (L.) Mill.
Sapin subalpin	*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.
Saule	*Salix* sp.

* Lichens: Hale, M.E., Jr. & W.L. Culberson. 1970. A fourth checklist of the lichens of the continental United States and Canada. *The Bryologist* 73(3):499-543.
Mousses (hypnes): Crum, H.A., W.C. Steere & L.E. Anderson. 1973. A new list of mosses of North America north of Mexico. *The bryologist* 76(1):85-130.
Plantes vasculaires: Moss, E.H. 1959. Flora of Alberta.
University of Toronto Press. Toronto, Ontario

** Les lichens des caribous sont aussi des lichens de couverture.

Annexe 2

Noms communs et noms scientifiques des maladies*

Brûlure printanière de l'épinette	*Sarcotrochila* sp.
Brûlure des pousses du peuplier faux tremble	*Venturia macularis* (Fr.) E. Müll & Arx
Faux gui du pin tordu latifolié	*Arceuthobium americanum* Nutt. ex Engelm.
Maladie hollandaise de l'orme	*Ceratocystis ulmi* (Buism.) C. Moreau
Pourridié-agaric	*Armillaria mellea* (Vahl ex Fr.) Kumm.
Rouge causé pas*Elytroderma*	*Elytroderma deformans* (Weir) Darker
Rouge de l'épinette	*Lophodermium* sp.
Rouille-balai de sorcière de l'épinette	*Chrysomyxa arctostaphyli* Diet.
Rouille des aiguilles de l'épinette	*Chrysomyxa ledicola* Lagh.
Rouille des feuilles du bouleau	*Melampsoridium betulinum* (Fr.) Kleb.
Rouille des feuilles du saule	*Melampsora epitea* Thüm.
Tache des feuilles du peuplier	*Marssonina populi*(Lib.) Magn.

* Agriculture Québec. 1975. *Noms des maladies des plantes au Canada*. 2e édition. Québec. Publication QA38-R4-1.

Annexe 3

Noms communs et noms scientifiques des insectes*

Charançon du pin blanc	*Pissodes strobi* (Peck)
Charançon du pin tordu	*Pissodes terminalis* Hopping
Dendroctone du pin ponderosa	*Dendroctonus ponderosae* Hopk.
Enrouleuse hâtive du tremble	*Pseudexentera oregonana* Wishm.
Livrée des forêts	*Malacosoma disstria* Hbn.
Mineuse de l'épinette	*Taniva albolineana* (Kft.)
Mineuse des feuilles du saule**	*Lyonetia* sp.
Phytopte (*Eriophyes*)	*Eriophyes* sp.
Tenthrède-mineuse de Thomson	*Profenusa thomsoni* (Konow)
Tétranyque de l'épinette	*Oligonychus ununguis* (Kft.)
Tordeuse des bourgeons de l'épinette	*Choristoneura fumiferana* (Clem.)
Tordeuse du pin gris	*Choristoneura pinus pinus* Free.

* Source, à moins d'indications contraires:
Agriculture Québec. 1975. *Noms français d'insectes au Canada* (avec noms latins et noms anglais correspondants). 4e édition. Québec. Publication QA38-R4-30.

** Service canadien des forêts. 1976 *Rapport annuel du relevé des insectes et des maladies des arbres, 1975*. Pêches et Environnement Canada. Ottawa

Annexe 4

Noms chimiques et abréviations

Amitrole	Amino-3 triazole-1,2,4
Bromacil	Bromo-5 *sec*-butyl-3 méthyl-6 uracile
CO	Monoxyde de carbone
Diméthoate	Dithiophosphate de 0, 0-diméthyle et de S-(N-méthylacétamid
Gypse	Sulfate de calcium
H_2S	Hydrogène sulfuré
Hyvar	Voir Bromacil
NaCl	Chlorure de sodium
NO	Oxyde nitrique
NO_2	Dioxyde d'azote
NO_x	Oxydes d'azote
O_3	Ozone
PAN	Nitrate de peracétyle
Piclorame	Acide amino-4 trichloro-3,5,6 picolinique
10^{-9}	Milliardième
10^{-6}	Millionnième
SO_2	Anhydride sulfureux
2,4-D	Acide dichloro-2,4 phénoxyacétique
2,4,5-T	Acide trichloro-2,4,5 phénoxyacétique

Index des polluants et des plantes

Acétylène, 28

Acide chlorhydrique, 34, **165**, **166**, **169-172**
(*voir* brouillards acides)

Acide nitreux, 52

Acide nitrique, 52

Acide sulfurique, 19, 34
(*voir* brouillards acides)

Aluminium, 20, 33

Amitrole, 56, 64, 72, **288**
symptômes chez le peuplier faux-tremble, **288**

Ammoniac, 48, 63

Anhydride sulfureux, 19, 20, 22, 24, 25, **95-110**
générateurs au charbon, 25, 28
industrie du gaz naturel et du pétrole, 19-25, 33-35, 60, **79-110**
phytotoxicité, 19-22
aiguë, 20
chronique, 20
transitoire, 22
symptômes sur la végétation
aralie à tige nue, **108**
aulne, **106**
bouleau, 24, **95-98**
conifères, 22, 24, **79-94**
épinette blanche, 22, **79**, **86**, **90**, **94**
épinette noire, 22, **84**, **88**, **91**
feuillus, 24, **95-99**, **101-104**, **107**
lédon du Groenland, **109**
peuplier, 24, **99**, **104**, **107**
peuplier faux-tremble, **79**, **101-103**
pin, 22, **79-82**, **85**, **87**, **89**, **92**, **93**
plantes ligneuses, 24, **100**, **105**, **106**, **108-110**
rosier, **110**
sapin baumier, **83**
saule, 24, **100**, **105**
tableau de sensibilité des essences, 20
industrie des mines et fonderies de métaux (cuivre-nickel-zinc), 37, 38, 40, 42, 61
industrie des pâtes et papiers, 48
(*voir aussi* gaz soufrés)

Aralie à tige nue
indemne, 6, **13**
symptômes de stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, **108**
hydrocarbures (liquides), **140**

Arsenic, 30, 37

Aulne vert
indemne, 6, **10**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 20, **106**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 42, **214**
hydrocarbures (liquides), **135**
oxydes d'azote, 51, **261**

Autres industries minières, 45, 46, **221-234**
(*voir* tas de matières calcaires [poussières calcaires, poussières de gypse et poussières siliceuses], poussières de ciment [oxydes de calcium, de potassium et de sodium] et industrie de la potasse [chlorures de potassium et de sodium])

Azote, 13

Bore, 14

Bouleau à papier
indemne, 5, **8**
symptômes des stress provoqués par les agents naturels
carences minérales, 12, **38**, **39**, **42**, **43**, **47**
insectes, **71**, **72**, **76**
maladies, **56**, **62**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 22, **95-98**
brouillards acides (acide chlorhydrique), **171**, **172**
déversements d'eau salée, 32, **151**, **152**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 42, **205-207**
herbicides (2, 4-D), 56, **272**
hydrocarbures (liquides), **130**
oxydes d'azote, **258**
pesticides (diméthoate), 56, 58, **290**
stérilisants du sol (chlorate de sodium), 58, **287**

Bromacil
symptômes sur la végétation, 56, 58, 63, **281-283**
épinette blanche, 58, **281**, **282**
pin, 58, **283**

Brouillards acides (acide chlorhydrique), 34, **165**, **166**, **169-172**
symptômes sur la végétation
bouleau, **171**, **172**
épinette blanche, **166**
peuplier, **169**, **170**
pin, **165**

Brouillards acides (acide sulfurique), 34, **167**, **168**
symptômes chez le peuplier faux-tremble, **167**, **168**

Bryophytes
(*voir* plantes de la couverture vivante, bryophytes)

Cadmium, 30, 37

Caractéristiques d'une végétation indemne, 5-7, **2-17**
(*voir aussi* les différentes essences)

Caragana, 46

Carences minérales, 12, 14, 20, **34-47**
azote, 13, **34-39**
bore, 14
cuivre, 14
fer, 14, **44**, **45**
magnésium, 52
manganèse, 14
molybdène, 14
phosphore, 14, **43**
potassium, 14, **40-42**
soufre, 14, **46**, **47**
zinc, 15

Cerisier de Virginie
indemne, 6
symptômes des stress provoqués par les pesticides, 56, 58, **289**

Chlorate de sodium, 58, 63, **284-287**
symptômes sur la végétation
bouleau, **287**
conifères, 58, **284, 285**
épinette blanche, **284**
feuillus, 58, **286, 287**
peuplier faux-tremble, 58, **286**

Chlorure d'hydrogène, 52

Chlorure de potassium (sel)
(*voir* industrie de la potasse)

Chlorure de sodium (sel)
(*voir* fosses de brûlage et éruptions de puits, industrie de la potasse et déversements d'eau salée)

Cuivre, 14, 37

2,4-D, 54-56, 63, **270-278**
symptômes sur la végétation
bouleau, **272**
conifères, 56
épinettes, 56
épinette blanche, **273-276**
peuplier, **270**
pin, 56, **277, 278**
saule, **271**

2,4,5-T, 54-56, 63, **267-269**
symptômes sur la végétation
peuplier, 56, **267**
peuplier faux-tremble, 56, **269**
saule, 56, **268**

Déversements d'eau salée, 30-33, 45, 60, **143-158**
phytotoxicité, 30
symptômes sur la végétation
bouleau, 32, **154, 155**
bryophytes, 33, **158**
conifères, 32, **143-150**
épinettes, 32, **143-145, 146, 149**
épinette blanche, **143**
épinette noire, **145, 146, 149**
feuillus, 32, **151, 152, 154-156**
lédon du Groenland, **157**
lichens, 33
peuplier, **156**
peuplier faux-tremble, 32, **154, 155**
pin, 32, **144, 147, 148, 150**
plantes herbacées et graminées, 32, **158**
plantes ligneuses, 32, **153, 157, 158**
saule, **153**

Diméthoate, 56, 64, **289, 290**
symptômes sur la végétation
bouleau, 58, **290**
cerisier de Virginie, 58, **289**

Dioxyde d'azote, 52
facteurs climatiques, 18, **28, 32, 33**
insectes, **63, 67, 68, 70**
maladies, **49-51, 55**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 20, **79, 86, 90, 94**
brouillards acides (acide chlorhydrique), **166**
déversements d'eau salée, **143**
éruptions de puits, **163**
florures, 40
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 38, **177-180**
herbicides (2,4-D), **273-276**
hydrocarbures (liquides), **111-114, 116, 118, 120, 122, 123**
poussières de ciment, **221**
soufre élémentaire, **160**
stérilisants du sol
bromacil, **281, 282**
chlorate de sodium, **284**
tas de matières calcaires, **232, 234**

Épinette du Colorado, 46

Épinette noire
indemne, 5
symptômes de stress provoqués par les agents naturels
facteurs climatiques, 11
maladies, **48**
symptômes de stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 20, **84, 88, 91**
déversements d'eau salée, **145, 146, 149**
fluorures, 40
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 38, **181-187**
soufre élémentaire, 33, **159**

Érable négondo
symptômes attribuables à l'industrie de la potasse, 46, **226**

Éruptions de puits
(*voir* fosses de brûlage et éruptions de puits)

Éthylène, 28
générateurs au charbon, 28

Facteurs climatiques, 8, 10, 12, **18-33**
chaleur (incendie), 12, **32, 33**
chaleur (tacheture hivernale), 12, **30, 31**
dessiccation hivernale, 8, **20, 21**
gelées, 10, 12, **25-29**
grêle, 10, **24**
humidité excessive, 10, **22**
inondations, 10, **22**
précipitations insuffisantes, 8, **18, 19**
rouge physiologique, 8, 10, **21**
sécheresse, 8, 10, **18-21**
sénescence naturelle, 10, 32, **23**
température et lumière, 10, 12, **25-33**

Facteurs de stress dus à la pollution, 3, 4, 18, 37, 38, 40, 42, 45
biologiques, 19, 25, 30, 32, 35, 36
chimiques, 19, 20
climatiques, 10, 12, 56, 58
édaphiques (sol), 20, 25, 33
(*voir aussi* localisation des dommages, transport à grande distance, phytotoxicité et sensibilité des essences aux

Fonderies d'aluminium
(*voir* fluorures)

Fonderies de nickel, de cuivre et de zinc (métaux lourds, SO^2 et particules y compris), 37-44, **173-198**, **201-220**
phytotoxicité, 37
symptômes sur la végétation
aulne, 42, **214**
bouleau, 42, **205-207**
bryophytes, 44, **218**, **219**
conifères, 37-40, **173-187**, **189-198**, **201-204**
épinettes, 37, 38, **177-187**
épinette blanche, **177-180**
épinette noire, 38, **181-187**
feuillus, 42, 44, **205-212**
lédon du Groenland, 42, **215**, **216**
lichens, 40, 42, 44, **188**, **201**, **217-220**
peuplier, 42, **211**, **212**
peuplier faux-tremble, 42, **208-210**
pins, 38, 40, **189-198**, **201-204**
plantes herbacées et graminées, 38, 42, **176**, **219**
plantes ligneuses, 42, **213-216**
saule, 42, **213**

Fongicides, 58

Fosses de brûlage et éruptions de puits, 34, **162-164**
symptômes sur la végétation
conifères, **162**
épinette blanche, **163**
lichens, 34
pins, **164**

Gasoil, 52

Gas d'échappement des automobiles, 53

Gas soufrés, 33, 34, 48, 50, 52

Générateurs au charbon et poussières de charbon, 25, 28, 30, 33, 52

Gouttelettes alcalines, 50, **249**, **250**
symptômes chez le pin, **249**, **250**

Hépatiques
(*voir* plantes de la couverture vivante, bryophytes)

Herbicides
(*voir* 2,4-D et 2,4,5-T)

Hydrocarbures, générateurs au charbon, 25, 28, 30, 52

Hydrocarbures, industrie du gaz naturel et du pétrole, 19, 24, 25-30, **111-142**
fosses de brûlage et éruptions de puits, 34
gazeux, 24, 25, 28, 30
liquides, légers, 25, 26, 60, **113**, 114, **117-135**, **138-142**
phytotoxicité, 25
symptômes sur la végétation
aralie à tige nue, **140**
aulne, **135**
bouleau, **130**
plantes ligneuses, 28, **127-129**, **135**, **139-142**
rosier aciculaire, **139**
sapin baumier, **121**

liquides, lourds, 24, 25-28, 60, **111**, **112**, **115**, **116**, **136-138**
phytotoxicité, 25, 26, 28
symptômes sur la végétation
conifères, 25, 26, **111**, **112**, **115**, **116**
épinette blanche, **111**, **112**, **116**
feuillus, 26-28, **137-138**
peuplier faux-tremble, **137**, **138**
pins, **115**
saule, **136**

Hydrocarbures, moteurs à combustion fixes, 24, 52, 53

Hydrogène sulfuré
industrie des pâtes et papiers, 48, 62
industrie du gaz naturel et du pétrole, 19, 34

Hydroxyde de sodium, 48, 62

Hypnes
(*voir* plantes de la couverture vivante, bryophytes)

Industrie du gaz naturel et du pétrole, 19-36, 60, **79-172**
(*voir aussi* brouillards acides, soufre élémentaire, fosses de brûlage et éruptions de puits, métaux lourds, hydrocarbures [charbon, hydrocarbures gazeux et liquides], hydrogène sulfuré, oxydes d'azote, déversements d'eau salée, soufre et anhydride sulfureux)

Industrie des pâtes et papiers, 48-51, 62, **235-250**
procédé au bisulfite, 48
procédé kraft, 48
symptômes sur la végétation
conifères, 48-51, **242-250**
lichens, 48, **235-241**
pin, 48-51, **242-250**
(*voir aussi* gouttelettes alcalines, hydrogène sulfuré et anhydride sulfureux)

Industrie de la potasse (chlorures de potassium et de sodium), 45, 61, **224-230**
phytotoxicité, 45, 46
symptômes sur la végétation
érable négondo, 46, **226**
peuplier faux-tremble, **227-230**
plantes herbacées et graminées, **224**
saule, 46, **225**
tableau de sensibilité des essences, 46

Industrie des produits chimiques agricoles, 54-58, 63, **262-290**
engrais à l'ammoniac anhydre, *voir* vapeurs d'ammoniac
herbicides, *voir* 2,4-D et 2,4,5-T
pesticides, *voir* diméthoate
stérilisants du sol, *voir* amitrole, bromacil, piclorame et chlorate de sodium

Insectes, 16, 17, **63-78**
cécidomyies, 16
charançons, 16, **68**, **69**
charançon du pin blanc, **68**
charançon du pin tordu, **69**

mineuse des feuilles du saule, **74**
mineuse du pin tordu, **66**
perce-pousse, diprions et tenthrèdes, 16
perceurs du bois, 17
phytoptes (*Eriophyes*), 78
scolytes
tenthrède-mineuse de Thomson, **72**
tétranyque de l'épinette, 16, **70**
tordeuses, 16, **63-65**
tordeuse du pin gris, 16, **64-65**
tordeuse des bourgeons de l'épinette, 16, **63**

Insecticides
(*voir* diméthoate et pesticides)

Lédon du Groenland
indemne, **11**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, **109**
déversements d'eau salée, **157**
fonderies (cuivre, nickel et zinc), 42, **215**, **216**

Lichens
(*voir* plantes de la couverture vivante, briophytes)

Localisation des dommages (caractéristiques, zone)

Magnésium, 33, 45, 52

Maladies, 14-16, **48-62**
bactéries, 14
brûlure des pousses, 16, **59**
brûlure des pousses du tremble, **59**
brûlure printanière, 14, **48**
brûlure printanière de l'épinette, **48**
faux gui sur le pin et l'épinette, 14, **55**
maladie hollandaise de l'orme, 17
maladies des racines, 16, **60-62**
mildiou, oïdium, 16, **58**, **59**
nématodes, 14
pourridié-agaric, 16, **60**, **61**
rouge, 14, 49, **52-54**
rouge causé par *Elytroderma*, 14, **52-54**
rouge de l'épinette, **49**
rouille des aiguilles, 14, **50**, **51**
rouille des aiguilles de l'épinette, **50**, **51**
rouille-balai de sorcière de l'épinette, **55**
rouille des feuilles, 16, **56**, **57**
rouille des feuilles du bouleau, **56**
rouille des feuilles du saule, **57**
tache des feuilles, 12, 58
tache des feuilles du peuplier, **58**
virus, 14

Manganèse, 14, 20, 45

Mélèze laricin
indemne, 5
symptômes des stress provoqués par les agents naturels
facteurs climatiques, 10
insectes, 16
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 20
hydrocarbures (liquides), **119**
soufre élémentaire, 33

Méthylmercaptan, 48, 62

Mines et fonderies de métaux, 37-44, 61, **173-220**
(*voir aussi* fonderies [nickel cuivre et zinc], fluorures [fonderies d'aluminium], métaux lourds et anhydride sulfureux)

Molybdène, 14

Monoxyde d'azote, 52

Monoxyde de carbone, 52

Moteurs à combustion fixes, 52-53, 62, **251-261**
(*voir aussi* oxydes d'azote, ozone, pan et anhydride sulfureux)

Mousses
(*voir* plantes de la couverture vivante, bryophytes)

Nickel, 30, 37

Orme d'Amérique, 17, 46

Oxydes d'azote, 52

Oxydes d'azote, générateurs au charbon, 25, 30, 52

Oxydes d'azote, industrie du gaz naturel et du pétrole, 19, 34

Oxydes d'azote, moteurs à combustion fixes, 52, 53, 62, **251-261**
symptômes sur la végétation
aulne, 50, **261**
bouleau, **258**
conifères, 50-52, **251-254**
feuillus, 50-52, **255-258**
peuplier, **256**
peuplier faux-tremble, **255**, **257**
pin, **251**, **254**
plantes ligneuses, 50-52, **259-261**
saule, **259**, **260**

Oxyde de calcium
(*voir* poussières de ciment)

Oxyde de potassium
(*voir* poussières de ciment)

Oxyde de sodium
(*voir* poussières de ciment)

Ozone, 52-53, 62

PAN, 52-53, 62

Particules, 19, 37, 61

Pesticides
(*voir* diméthoate)

Peuplier baumier
indemne, 5, 6
symptômes des stress provoqués par les agents naturels

2,4-D, **270**
2,4,5-T, **267**
hydrocarbures (liquides), **134**
industrie de la potasse, 45, 46
oxydes d'azote, **256**
stérilisants du sol (piclorame), **280**
vapeurs ammoniacales, 54, **262**, **263**, **266**

Peuplier faux-tremble
indemne, 5, **7**
symptômes des stress provoqués par les agents naturels
facteurs climatiques, 8-12, **20**, **22**, **23**, **29**
insectes, **73-77**
maladies, **59**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 20, **79**, **101**, **103**
brouillards acides (acide sulfurique), **167**, **168**
déversements d'eau salée, 32, **154**, **155**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 42, **208**, **210**
herbicides (2,4,5-T), 54, 56, **269**
hydrocarbures (liquides), **131-133**, **137**, **138**
industrie de la potasse, **227-230**
oxydes d'azote, **255-257**
poussières de ciment, **223**
stérilisants du sol
amitrole, **288**
chlorate de sodium, 56, **286**
vapeurs ammoniacales, 54, **264**

Phosphore, 14, 40

Phytotoxicité, 19-20, 29, 30, 32, 37
anhydride sulfureux, 19-20
déversements d'eau salée, 32, 33
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 37
hydrocarbures (liquides), 25
industrie de la potasse, 45

Piclorame, 56-58, 63, **279**, **280**
symptômes sur la végétation
peuplier, **280**
pin, **279**

Pin gris et pin tordu latifolié
indemnes, 5, **2**, **3**
symptômes des stress provoqués par les agents naturels
carences minérales, 40, 44, 45
facteurs climatiques, 21, **24-27**, **30**, **31**
insectes, 16-17, **64**, **66**, **69**
maladies, 14, **52-54**, **60**, **61**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 19-24, **79-82**, 85, **87**, **89**, **92**, **93**
brouillards acides (acide chlorhydrique), **165**
déversements d'eau salée, 30, 32, **144**, **147**, **148**, **150**
éruptions de puits, **164**
fluorures, 40, **199**, **200**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 38, 40, **189-198**, **201-204**
herbicides (2,4-D), 54, **277**, **278**
hydrocarbures (liquides), **115**, **117**
industrie des pâtes et papiers, 48-50, **242-250**
oxydes d'azote, **251-254**
stérilisants du sol
bromacil, 56, **283**
chlorate de sodium, **285**
piclorame, **279**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 42, 44, **218**, **219**
hydrocarbures (liquides), 28, **142**
poussières de ciment, 45

Plantes de la couverture vivante, lichens
comme bioindicateurs, 3, 4, 34, 36, 38, 40
indemnes, 6, **14**, **15**, **17**
symptômes des stress provoqués par les polluants
déversements d'eau salée, 33
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 38, 40, 42, 44, **188**, **201**, **217-220**
fosses de brûlage et éruptions de puits, 34
hydrocarbures (liquides), 26, 28, **126**, **142**
industrie des pâtes et papiers, 48, **235**, **241**
poussières de ciment, 45

Plantes de la couverture vivante, plantes herbacées et graminées
indemnes, 6
symptômes des stress provoqués par les polluants
déversements d'eau salée, 33, **158**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 42, **176**, **219**
hydrocarbures (liquides), 26-28, **125**, **141**, **142**
industrie de la potasse, **224**
poussières de ciment, 45
soufre élémentaire, 33, **161**

Plantes de la couverture vivante, plantes ligneuses
indemnes, 6
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 22, 24, **100**, **105**, **106**, **108-110**
déversements d'eau salée, 30, **153**, **157**, **158**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 40, **213**, **216**
hydrocarbures (liquides), 25-28, **127-129**, **135**, **139-142**
oxydes d'azote, moteurs à combustion fixes, 52-53, **259-261**
poussières de ciment, 45
soufre élémentaire, **161**
(*voir aussi* aralie à tige nue, aulne, cerisier de Virginie, lédon du Groenland, rosier aciculaire et saule)

Plantes herbacées et graminées
(*voir* plantes de la couverture vivante, plantes herbacées et graminées)

Plantes ligneuses
(*voir* plantes de la couverture vivante, plantes ligneuses)

Plomb, 30, 37

Polyéthylène, 28

Potassium, 12

Poussières
(*voir* tas de matières calcaires, poussières de ciment, générateurs au charbon et poussières de charbon)

Poussières calcaires
(*voir* tas de matières calcaires)

Poussières de ciment (oxydes de calcium, de potassium et de sodium et gypse), 45, 61, **221-223**
symptômes sur la végétation
bryophytes, 45

Poussières siliceuses
(*voir* tas de matières calcaires)

Propylène, 28

Restauration
déversements d'eau salée, 30
déversements d'hydrocarbures, 25
métaux lourds et anhydride sulfureux, 37, 38

Rosier aciculaire
indemne, 6, **12**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, **110**
hydrocarbures (liquides), **139**

Sapin baumier
indemne, 5
symptômes des stress provoqués par les agents naturels,
insectes, 16
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 20, **83**
hydrocarbures (liquides), **121**

Sapin subalpin, 20

Saule
indemne, 6, **9**
symptômes des stress provoqués par les agents naturels
carences minérales, 12, **36**, **37**, **46**
insectes, **74**, **75**, **78**
maladies, **57**
symptômes des stress provoqués par les polluants
anhydride sulfureux, 20, 22, 24, **100**, **105**
déversements d'eau salée, **153**
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 42, **213**
herbicides
2,4-D, **271**
2,4,5-T, 54, 56, **268**
hydrocarbures (liquides), **127-129**
industrie de la potasse, 45, 46, **225**
oxydes d'azote, **259**, **260**
poussières de ciment, **222**
vapeurs ammoniacales, **265**

Sélénium, 19

Sels d'ammonium, 48

Sensibilité des essences aux polluants
anhydride sulfureux, 20
déversements d'eau salée, 30, 32, 33
fonderies (nickel, cuivre et zinc), 37, 38, 40, 42, 44
herbicides, 54, 56
industrie de la potasse, 45, 46

Silicate d'aluminium, 20

Smog photochimique, 53

Soufre, 3
carences, 14
charbon, 33
cimenteries, 45
industrie du gaz naturel et du pétrole, 19, 33
mines et fonderies de métaux, 37, 38, 40
(*voir aussi* soufre élémentaire)
plantes herbacées et graminées, 33, **161**
plantes ligneuses, **161**

Stérilisants du sol
(*voir* amitrole, bromacil, chlorate de sodium et piclorame)

Sulfate, 19

Sulfite, 19

Sulfure de diméthyle, 48, 62
Symptômes des stress, provoqués par les agents naturels, 3, 5, 8-17, **18-78**
(*voir aussi* carences minérales, facteurs climatiques, insectes, maladies et les entrées pour les diverses essences)

Tas de matières calcaires (poussières calcaires, poussières de gypse et poussières siliceuses), 46, 61, **231-234**
symptômes sur la végétation
épinette blanche, **232**, **234**
feuillus, **231**, **233**

Transport à grande distance des polluants atmosphériques, 8

Vanadium, 30

Vapeurs ammoniacales (des engrais à l'ammoniac anhydre), 54, 63, **262-266**
symptômes sur la végétation
peuplier, 54, **262**, **263**, **266**
peuplier faux-tremble, 54, **264**
saule, **265**

Végétation indemne, 5-7, **2-17**
(*voir aussi* les entrées pour les diverses essences)

Zinc, 14, 37